

**Gewinnung sicherer Lastannahmen aus
Simulation und Messung zur
Festigkeitsauslegung von Straßen- und Stadtbahnen**

Von der
FAKULTÄT MASCHINENWESEN
der
TECHNISCHEN UNIVERSITÄT DRESDEN
zur

Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
angenommene Dissertation

Dipl.-Ing. Gero Zechel
geboren am 14. Mai 1984 in Filderstadt

Tag der Einreichung: 29. Februar 2016

Tag der Verteidigung: 12. Juli 2016

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Beitelschmidt, Prof. Dr.-Ing. Sebastian Stichel

Vorsitzender der Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht



Veröffentlicht unter dem URN **urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-218711**. Dauerhaft zugänglich und zitierfähig über die URL <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-218711>. Zur Verfügung gestellt unter der Creative Commons Lizenz CC-BY-NC 4.0.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Dresden entstanden. Die Forschung und Entwicklung erfolgte im Rahmen des *Bombardier Center of Competence for Railway Systems Engineering and Integration*. Begonnen an der Professur für Fahrzeugmodellierung und -simulation der Fakultät Verkehrswissenschaften *Friedrich List* wurde die Arbeit an der daraus hervorgegangenen Professur für Dynamik und Mechanismentechnik der Fakultät Maschinenwesen zu Ende geführt. Ihre Fertigstellung erfolgte schließlich parallel zu meiner beruflichen Tätigkeit im Bereich Fahrzeugdynamik bei der Bombardier Transportation GmbH. Wichtige Grundsteine für die Arbeit waren das Studium der Mechatronik, das mir eine systemtheoretische und informationstechnische Sichtweise auf ingenieurtechnische Herausforderungen vermittelt hat, sowie ein Fachpraktikum, das im 9. Semester mein Interesse für die praktischen Aspekte bei der Entwicklung von Schienenfahrzeugen geweckt hat. Bei der Anfertigung dieser Arbeit haben mich viele Menschen begleitet, denen ich im Folgenden meinen Dank aussprechen möchte.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Michael Beitelschmidt. Ohne sein langjähriges Vertrauen und die fortwährende Unterstützung meiner wissenschaftlichen Tätigkeit, seit meiner Studienarbeit bis heute, wäre mein Weg anders verlaufen und diese Arbeit nicht möglich gewesen. Herzlicher Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Sebastian Stichel für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Für seine Vorarbeit auf dem Fachgebiet und seine weitere Unterstützung bedanke ich mich bei Dr. Matthias Harter, Dr. Robert Schimke, Dr. Volker Quarz, Dr. Christian Klotz, Claudius Lein, Alexander Heghmanns, Gunther Dürrschmidt, Johannes Stier, Dr. Peter Hartwig, Uwe Steglich und Dr. Martin Kache danke ich für eine tolle Arbeitsatmosphäre am Institut.

Für ihre langjährige fachliche Förderung danke ich Dr. Helmut Netter, Harald Hentschel und Marcel Dinter, für praktische Unterstützung und fachliche Diskussion danke ich Christian Becker, Steffen Mieth, Michael Lenz und Florian Immel, für rechentechnische und messtechnische Unterstützung Falko Berger, Gerd Striegler und Bernd Herrmann. Auch die fahrzeugtechnische Unterstützung durch die Dresdner Verkehrsbetriebe war für die Arbeit von großer Bedeutung.

Meinen Eltern danke ich für bedingungslosen Rückhalt, meiner Schwester Laura dafür, dass sie mir immer wieder gezeigt hat lange Wege zu gehen. Nicht zuletzt bin ich für unerschütterliche Unterstützung wie unermüdliche Ablenkung meiner Freundin Henrike und meinen werten Freunden Dr. Matthias Fatke und Michael M. Bader zu Dank verpflichtet.

Gero Zechel
Dresden, im Februar 2016

Für Jakob

Inhalt

Formelzeichen	xi
Abkürzungen	xiv
1 Einleitung	1
1.1 Festigkeitsauslegung von Straßen- und Stadtbahnen	2
1.2 Bedeutung von Simulation und Messung	4
1.3 Ziele und Aufbau der Arbeit	5
2 Messung von Fahrzeug und Gleis	8
2.1 Fahrzeugmessung	8
2.1.1 Messung des Ortes	9
2.1.2 Messung der Fahrgeschwindigkeit	10
2.1.3 Erkennen der Bewegungsrichtung	12
2.1.4 Messung des Fahrzeugzustands	14
2.1.5 Messung von Dehnungen und Strukturspannungen	16
2.1.6 Messung von Schnittlasten	18
2.2 Einzelmessungen an Fahrzeugen	20
2.2.1 Statische Messungen	20
2.2.2 Dynamische Messungen	22
2.3 Langzeitmessung von Fahrzeugen	22
2.3.1 Umsetzbarkeit in der Praxis	22
2.3.2 Herangehensweisen bei der Datenauswertung	25
2.3.3 Speicherung von Zwischenergebnissen und Ergebnissen	28
2.4 Gewinnung von Gleislagedaten	30
2.4.1 Direkte Messverfahren	30
2.4.2 Erzeugung aus GIS-Daten	32
2.5 Zusammenführung von Fahrzeugmessung und Gleislagedaten	35
2.5.1 Synchronisierung von Gleis- und Fahrzeugmessung	35
2.5.2 Zuordnung von Langzeitmessungen zum Gleisnetz	39

3	Modellbildung von Straßen- und Stadtbahnen	50
3.1	Grundlagen	50
3.2	Modellierung des Fahrwegs	52
3.2.1	Beschreibung des Gleises	52
3.2.2	Beschreibung der Schienen	52
3.2.3	Einbindung gemessener Gleislage	53
3.3	Modellierung des Fahrwerks	54
3.3.1	Rad-Schiene-Kontakt	54
3.3.2	Antrieb und Antriebsregelung	57
3.3.3	Federstufen, Dämpfung und Anlenkung des Fahrwerks	58
3.4	Modellierung der Gelenke	61
3.4.1	Vorüberlegungen	61
3.4.2	Wagenkastengelenke	61
3.4.3	Gelenke mit besonderer Kinematik	62
3.5	Modellierung des Wagenkastens	63
3.5.1	Modellierung als Starrkörper mit Ersatzsteifigkeiten	64
3.5.2	Modellierung mit der Finite-Elemente-Methode	67
3.5.3	Modellierung als ordnungsreduzierte elastische Struktur	69
3.6	Erstellung des Gesamtmodells für die Lastsimulation	72
3.6.1	Systematisierung der Schnittknoten und Schnittlasten	72
3.6.2	Ermittlung der Schnittlasten	73
3.6.3	Prozessablauf für die Bildung des Gesamtmodells	74
4	Simulation von Lastfällen	77
4.1	Lastfälle auf Basis synthetischer Gleislage	77
4.2	Lastfälle auf Basis realer Gleislage	79
4.3	Sonderlastfälle	80
4.3.1	Falschfahrt an Weichen	80
4.3.2	Anheben und Bergen	81
4.4	Vorgabe der Fahrgeschwindigkeit	82
4.4.1	Problemstellung	82
4.4.2	Einbindung gemessener Fahrgeschwindigkeiten	83
4.4.3	Synthese realitätsnaher Geschwindigkeitsprofile	84
4.5	Simulationsprozess	88
4.5.1	Prozessketten	88
4.5.2	Automatisierung	90
4.5.3	Praktische Umsetzung	93

5	Auswertungsmethoden zur Lastgewinnung und zur Festigkeitsbe-	97
	wertung	
5.1	Gewinnung von Auslegungslasten aus den Schnittlastzeitreihen	97
5.1.1	Bewertungsgrößen zur Auswahl der zu betrachtenden Zeitpunkte	97
5.1.2	Bestimmung der Bewertungsgrößen anhand der Schnittlasten . .	98
5.1.3	Ermittlung von Spannungszeitverläufen	103
5.2	Gemeinsame Auswertung gemessener und simulierter Zeitreihen	105
5.2.1	Möglichkeiten der gemeinsamen Darstellung	105
5.2.2	Korrelation aller Einfluss- und Ergebnisgrößen	107
5.2.3	Modellanalyse durch Korrelation der Fehlergrößen	109
5.2.4	Analyse des Betriebsspiegels	110
5.3	Zählverfahren zur Auswertung von Spannungszeitreihen	114
5.3.1	Existierende Zählverfahren	115
5.3.2	Vorbetrachtung kontexterhaltender Rainflow-Verfahren	120
5.3.3	Rainflow-Verfahren ohne Informationsverlust	122
5.4	Festigkeitsbewertung anhand der Rainflowtabelle	128
5.4.1	Rainflowmatrix	128
5.4.2	Beanspruchungskollektiv	129
5.4.3	Äquivalentamplitude und Auslastungsgrad	131
5.4.4	Schädigungssumme	134
5.4.5	Kontextbezogene Auswertung	136
6	Zusammenfassung und Ausblick	141
6.1	Zusammenfassung	141
6.1.1	Messung	141
6.1.2	Modellbildung	143
6.1.3	Simulation	144
6.1.4	Auswertung	144
6.2	Ausblick	145
	Literaturverzeichnis	147
	Tabellenverzeichnis	155
	Abbildungsverzeichnis	156

Formelzeichen

a	Beschleunigung (Skalar)
A	Abstand zwischen Wöhler- und Lebensdauerlinie
\mathcal{A}, \mathcal{B}	Mengen zur Erfassung von Schnittgrößen
c	Korrekturfaktor
D	Schädigungssumme
\mathbf{D}	Dämpfungsmatrix
E	Bewertungsgröße
ε	Dehnung, einachsig
f	Abtastfrequenz
F	Kraft (Skalar)
g	Erdbeschleunigung
\mathcal{G}, \mathcal{H}	Mengen zur Erfassung von Hystereseschleifen
i, j	Allgemeine Zählindizes
\mathbf{I}	Identitätsmatrix
j_D	Gesamtsicherheitsfaktor (in Kapitel 5)
\mathcal{J}	Menge einzelner Indexwerte j
k, l	Zählindizes (in der Regel Indizierung äquidistanter Zeitschritte)
\mathbf{k}	Wöhlerlinienexponent
\mathbf{K}	Steifigkeitsmatrix
κ	Krümmung
\mathcal{K}	Menge einzelner Indexwerte k
Kor_e	empirischer Korrelationskoeffizient
lat	<i>Latitude</i> (geographische Breite, Breitengrad)
lon	<i>Longitude</i> (geographische Länge, Längengrad)
m	Anzahl (Zeitschritte); Masse
M	Moment (Skalar)
\mathbf{M}	Massenmatrix
n	Anzahl (Allgemein)
ω	Winkelgeschwindigkeit (einachsig, skalar)
p	skalarer Strafwert

P	Matrix der Strafwerte
φ	Richtung; Ausdrehwinkel
q	Vektor der generalisierten Koordinaten
r	Radius
r	Ortsvektor
R	Spannungsverhältnis
R	Rainflowmatrix
s	Weg entlang der Gleismittenachse
σ	Spannung
t	Zeit
T	Transitionsmatrix (in Kapitel 2), Transformationsmatrix (in Kapitel 3)
u	Gleisüberhöhung
U	Übertragungsmatrix
v	Fahrzeuggeschwindigkeit (Skalar)
W	Zustandswechselmatrix
x	Fahrzeuglängsrichtung
X	Klasse
y	Fahrzeugquerrichtung
z	Fahrzeughochrichtung
\bullet^a	Amplitude
\bullet^{aW}	Wechselamplitude
\bullet^D	Druckbeanspruchung
\bullet^e	Endwert
\bullet^F	auf Fahrzeugseite gemessen
\bullet^G	auf Gleisseite gemessen
\bullet^h	horizontal
\bullet^{Max}	Maximalwert
\bullet^{Min}	Minimalwert
\bullet^o	Oberwert
\bullet^p	Umkehrwert
\bullet^r	rückwärts
\bullet^s	Startwert
\bullet^u	Unterwert
\bullet^v	vertikal (allgemein), vorwärts (in Kapitel 5)
\bullet^Z	Zugbeanspruchung
\bullet^+	Pseudoinverse nach MOORE/PENROSE

• _{äqu}	Äquivalentwert
• _b	Biegung
• _B	Bogen
• _{dyn}	dynamisch
• _D	Dauerfestigkeit
• _{ele}	nach MINER elementar
• _{ertr}	ertragbar
• _{ges}	Gesamtwert
• _{kon}	nach MINER konsequent
• _N	Normalenrichtung
• _q	quer
• _{red}	reduziert
• _{rel}	Relativwert
• _{stat}	statisch
• _S	Schub
• _t	Torsion
• _T	Tangentialrichtung
Δ•	Differenzgröße; Schrittweite einer Folge
sgn•	Signumfunktion
max•	Maximalwert einer Folge oder Menge
min•	Minimalwert einer Folge oder Menge
arg max•	Argument des Maximalwerts einer Folge
arg min•	Argument des Minimalwerts einer Folge
Median•	Median (0,5-Quantil) einer Folge oder Menge
⌈•⌉	Aufrundung zur ganzen Zahl
⌊•⌋	Abrundung zur ganzen Zahl
$\bar{\bullet}$	Arithmetischer Mittelwert
•★•	Kreuzkorrelation
•○•	Verkettung zweier Funktionen
•∪•	Vereinigung zweier Mengen
#•	Mächtigkeit (Anzahl Elemente) einer Menge
∅	leere Menge

Abkürzungen

API	Application Programming Interface (Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung)
ASTM	Standardisierungsorganisation, ursprünglich <i>American Society for Testing and Materials</i>
BP	Bandpass-Filter
CAD	<i>Computer-aided design</i> (rechnergestützte Konstruktion)
DMS	Dehnmessstreifen
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren
EMKS	elastisches Mehrkörpersystem
FAT	<i>Fatigue class number</i> , die Ermüdungsfestigkeit beschreibende Bauteilklass
FE	Finite-Elemente, nach der Finite-Elemente-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
GIS	<i>Geographic information system</i> (Geoinformationssystem)
GKK	Gauß-Krüger-Koordinatensystem, kartesisches Koordinatensystem in der Geodäsie
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Navigationssatellitensystem)

HP	Hochpassfilter
IIW	<i>International Institute of Welding</i> , internationaler Verband für Schweißen und verwandte Verfahren
MKS	Mehrkörpersystem
MVB	<i>Multifunction Vehicle Bus</i> , Fahrzeugbussystem
NaN	<i>Not a Number</i> , undefinierter oder nicht darstellbarer numerischer Wert
NMEA	National Marine Electronics Association
ODE	Gewöhnliches Differentialgleichungssystem
ORE	<i>Office de Recherches et d'Essais</i> , Forschungs- und Versuchsanstalt des Internationalen Eisenbahnverbandes
PDE	Partielles Differentialgleichungssystem
Pt100	Platin-Widerstandsthermometer
SODASRT2	MKS-Solver (Lösungsalgorithmus)
TP	Tiefpassfilter
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
WGS 84	<i>World Geodetic System 1984</i> , geodätisches Referenzsystem
Wgt.	Wagenteil (durch Gelenke abgegrenztes Fahrzeugsegment)
WK	Wagenkasten

1 Einleitung

Straßen- und Stadtbahnen prägen den Nahverkehr vieler Städte zum Teil seit mehr als hundert Jahren. Dass sie diese Bedeutung in den vergangenen Jahrzehnten nicht eingebüßt haben, sondern weiter ausbauen konnten, hängt auch damit zusammen, dass die Fahrzeuge in ihren Grundkonzepten und durch ihre stete technische Weiterentwicklung den steigenden Anforderungen und Ansprüchen des Personennahverkehrs gerecht werden.

Diese Fortentwicklung hin zu noch höherer Energieeffizienz, größerer Beförderungskapazität, kürzeren Fahrgastwechselzeiten, höherer Sicherheit, Barrierefreiheit und höherem Fahrkomfort hat auch die Komplexität der Fahrzeuge erhöht. So bietet ein modernes Fahrzeug in diesem Segment beispielsweise weitgehende Niveaugleichheit des Fußbodens mit niedrigen Einstiegshöhen. Dies erfordert im Allgemeinen eine veränderte Geräteanordnung und insbesondere bei Straßenbahnfahrzeugen eine Niederflerbauweise mit Verlagerung herkömmlich unterflur platzierter Aggregate auf das Dach. Der Wunsch nach großen, durchgängigen Portalen zwischen den Wagenkästen, großen Fensterflächen und einer möglichst hohen Anzahl an Türen erschwert es gleichzeitig, die dann erheblichen Dachmassen vertikal und im Bogen lateral zu stützen.

Die für die Niederflerbauweise entwickelten neuen Fahrwerkskonzepte weisen in der Regel geringe Federwege und eine insgesamt steifere Anbindung an das Untergestell auf. Beides führt zu erhöhten Lasten am Wagenkasten, da gleisseitig vorgegebene Weganregungen sehr direkt auf die Wagenkastenstruktur wirken. Hierbei erfordert die große Länge der Fahrzeuge im Zusammenspiel mit der anspruchsvollen Topografie vieler Innenstädte eine Gelenkkonfiguration, die es den Fahrzeugen erlaubt, sich über mehrere Elemente einer Bogen-, Kuppen- und Wannenfolge zu erstrecken, ohne dass sich die Wagenteile gegeneinander verspannen. Nicht nur, aber insbesondere bei Multigelenkfahrzeugen mit charakteristisch kurzen Wagenteilen und vielen Gelenken stellt dies eine Herausforderung dar [Voc10], da es im Konflikt mit der Notwendigkeit steht, die Wagenkästen an den oberen Gelenken in Quer- und Längsrichtung gegeneinander abzustützen.

In der Summe ist festzustellen, dass die Weiterentwicklung der Fahrzeuge eine erhebliche Veränderung der Wagenkastenbelastungen bewirkt hat. Es bedarf daher einer Festigkeitsauslegung, die den großen fahrzeugtechnischen Änderungen Rechnung trägt, indem sie mit gleichem oder höherem Entwicklungstempo vorangetrieben wird.

1.1 Festigkeitsauslegung von Straßen- und Stadtbahnen

Maßgebend für die Festigkeitsauslegung leichter Schienenfahrzeuge ist die Richtlinie 152 [Bug+92] des Verbands deutscher Verkehrsunternehmen (VDV). Die Richtlinie fordert eine Auslegung der Bauteile zum einen gegen Streckgrenze, also gegen Materialversagen bei einmaliger außergewöhnlicher Belastung, zum anderen gegen Dauerbruch, also gegen Materialversagen durch gewöhnliche, regelmäßige Belastungen mit in der Regel mehr als $5 \cdot 10^6$ Schwingspielen (auch *Dauerfestigkeitsnachweis*). Eine Auslegung gegen Zeitfestigkeit wird in der Schrift als Verfahren aufgezählt, das wegen der fehlenden Aufbereitung für den Schienenfahrzeugbau nur im Ermessen der Hersteller und Betreiber und nur im Einzelfall angewendet werden könne.

Die Lastannahmen der VDV-Richtlinie beruhen auf je drei Messfahrten für den U-Bahn-Bereich und den Stadtbahnbereich. Diese wurden zu Ende der 1980er Jahre in sechs nicht genannten Verkehrsbetrieben durchgeführt. Die Messungen sind in [Bug+89] dokumentiert. Die Beschreibung der Lastannahmen erfolgt fallunterschieden und dabei zum Großteil auf Basis von Bauteilbeschleunigungen. Ein Beispiel zeigt Bild 1.1.

Bezüglich der Fahrzeugmasse legt die Richtlinie fest, wie diese hinsichtlich verschiedener Beladungszustände unter Berücksichtigung der vorhandenen Sitzplätze und Stehplatzflächen zu ermitteln ist. Insbesondere definiert sie hier die *Zweidrittellast* als Beladungszustand mit zwei Drittel der möglichen Fahrgastkapazität und zwei Drittel der Betriebsstoffkapazität (maßgeblich Sand) und schreibt diesen für den Dauerfestigkeitsnachweis vor.

Aus den fallweise gegebenen Beschleunigungen und bekannten Massen ergeben sich jeweils die auf den Wagenkasten wirkenden äußeren Lasten. Diese greifen in den fallab-

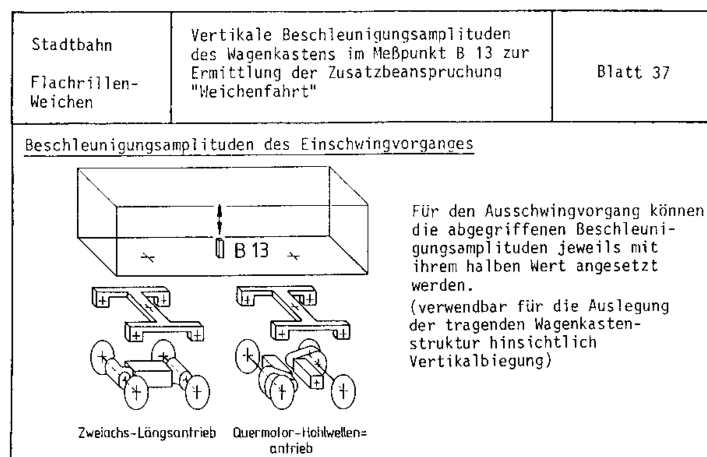


Bild 1.1: Beispiel einer Lastbeschreibung nach der VDV-Richtlinie 152 [Bug+92] (Originalabbildung)

hängig zu wählenden Lagerpunkten an und führen zu einer Beanspruchung der Wagenkastenstruktur.

Die Gesamtbeanspruchung setzt sich nach der Richtlinie aus Grundbeanspruchungen und Zusatzbeanspruchungen zusammen. Die während der Fahrt dauernd wirksamen Grundbeanspruchungen, hervorgerufen beim Rollvorgang auf der Geraden, werden demnach überlagert von den nur zeitweise wirksamen Beanspruchungen durch

- Beschleunigungs- und Bremsvorgänge,
- Bogenlauf,
- Weichenfahrt,
- fahrzeug- und oberbauseitige Besonderheiten,
- Seitenwind,
- Aufstoßvorgänge,
- Ausfall oder Bruch von Federelementen und
- Anheben des Fahrzeugs,

welche als Zusatzbeanspruchung bezeichnet werden. Die Gesamtbeanspruchung ergibt sich so als Linearkombination dieser Teilbeanspruchungen.

Der **Festigkeitsnachweis** wird prinzipiell geführt, indem die auf diese Weise ermittelte Beanspruchung der Beanspruchbarkeit gegenüber gestellt wird. Aufgrund der Bauweise von Straßen- und Stadtbahnwagenkästen ist für die Bestimmung der Beanspruchbarkeit die Bewertung von Schweißnähten an geschweißtem Stahlblech von zentraler Bedeutung. Wegen der komplexen Wagenkastengeometrie kann dabei in der Regel nicht nach einem reinen Nennspannungskonzept, jedoch nach dem Strukturspannungskonzept gearbeitet werden. Bei diesem wird die Spannung am Schweißnahtfuß betrachtet und die Kerbwirkung der Schweißnaht wird, wie beim Nennspannungskonzept, nicht auf der Beanspruchungsseite, sondern auf der Beanspruchbarkeitsseite berücksichtigt.

Die Beanspruchbarkeit kann dabei durch die Bauteil-Wöhlerlinie beschrieben werden. Sie steht im konkreten Fall in Abhängigkeit zu den Materialeigenschaften und einer Vielzahl von Schweißnahteigenschaften. Diese Schweißnahtbewertung und damit die Ermittlung der ertragbaren Spannungen erfolgt dabei meist nach der DVS1612 [Dvs07], der DIN EN 15085 [En13] und den IIW-Empfehlungen [Hob96]. Auf letzterer basiert eine Einstufung der Schweißnaht in FAT-Klassen, die ihre ertragbare Doppelspannungsamplitude für $2 \cdot 10^6$ identische, mittelspannungsfreie Schwingspiele definiert. Die Schar der resultierenden Bauteil-Wöhlerlinien zeigt Bild 1.2.

Die Führung des Festigkeitsnachweises erfolgt regelmäßig nach der FKM-Richtlinie [Fkm12]. Sie definiert die anzusetzenden Sicherheitsfaktoren und gibt Verfahren zur Ermittlung eines Auslastungsgrads vor. Dabei kann abweichend von den bestehenden

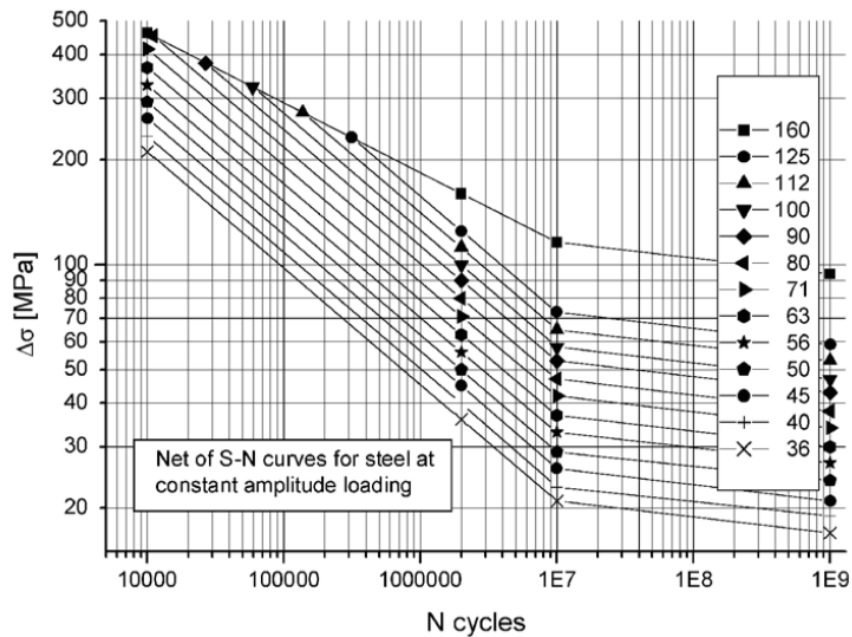


Bild 1.2: FAT-Klassen nach IIW-Empfehlungen, Doppelamplitude für $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel

normativen Anforderungen neben dem Dauerfestigkeitsnachweis auch ein Betriebsfestigkeitsnachweis geführt werden.

Tritt beim Festigkeitsnachweis eine Überauslastung einer Schweißnaht auf, kann dem auf drei unterschiedliche Weisen begegnet werden: Durch Reduzierung der Lasten (zum Beispiel durch eine optimierte Fahrzeugauslegung), durch Reduzierung der Beanspruchung (zum Beispiel durch Erhöhung der Materialstärken) oder durch Erhöhung der Beanspruchbarkeit (zum Beispiel durch Wahl einer anderen Schweißnahtausführung).

1.2 Bedeutung von Simulation und Messung

Es besteht herstellerübergreifend ein Konsens darin, dass bei Fahrtmessungen Fahrzeugbeanspruchungen feststellbar sind, die nicht anhand der herkömmlichen Lastannahmen und Berechnungswege erklärbar sind und dass mit Hilfe der Simulation ein höherer Lasteintrag in die Wagenkästen gezeigt werden kann [Bob+08]. Eine überarbeitete und fortgeschriebene VDV-Richtlinie [Vdv16], die erstmals auch Vorgaben zur Simulation der Fahrzeuge für die Gewinnung von Auslegungslasten macht, befindet sich bereits in Arbeit.

Die Gewinnung der Fahrzeuglasten durch Simulation stellt einen Paradigmenwechsel dar – von der fahrzeugtypspezifischen analytischen Betrachtung stark abstrahierter Fahrzeugmodelle hin zur allgemeinen numerischen Berechnung möglichst realitätsge-

treuer Fahrzeugmodelle. Mit steigendem Detaillierungsgrad der Simulationsmodelle ist auch die Zahl ihrer Eingangsparameter gestiegen. Sowohl die Gewinnung dieser Eingangsgrößen als auch die Validierung der Ausgangsdaten erfordert Messungen am Fahrzeug. Die Messung kann es dabei auch ermöglichen, Ursachen für hohe Lasten aufzuspüren und Maßnahmen herzuleiten, um diesen Ursachen entgegenzuwirken.

Es ist Stand der Technik, Fahrzeugmessungen durchzuführen, um praktische Nachweise verschiedenster Art an Neufahrzeugen zu führen und um positive und negative Eigenschaften von Bestandsfahrzeugen nachzuvollziehen. Diese Messungen können von erheblichem Umfang und entsprechend hohem Aufwand sein. Dabei existieren im Wesentlichen fünf Kostenblöcke:

- (1) Personalaufwand zur Erstellung der technischen Spezifikation einer Messung;
- (2) Personalaufwand und ggf. Reisekosten für die Applikation der Messtechnik;
- (3) Abschreibungskosten der Messtechnik inkl. Kosten für Kalibrierung;
- (4) Personalaufwand und Fahrzeugbetriebskosten für die Durchführung der Messfahrt;
- (5) Personalaufwand für die Auswertung der Messdaten.

In der Vergangenheit waren die Kosten für die bei einer Messfahrt benötigte technische Ausrüstung (3) stets ein Vielfaches höher als die bei der Vor-Ort-Ausrüstung und Messdurchführung entstehenden Personalkosten (2) und (4). Dieses Verhältnis verkleinert sich fortwährend. In Folge dessen, dass keine Umkehr dieser Entwicklung absehbar ist, muss zunehmend in Betracht gezogen werden, Messtechnik dauerhaft und ab Werk im Fahrzeug zu verbauen und Messungen über die großen Zeiträume des tatsächlichen Fahrzeugbetriebs automatisiert durchzuführen. Dies erfordert einen erhöhten Planungsaufwand (1). Damit die Aufwendungen zur Auswertung (5) nicht steigen, sind gezielte, ebenfalls automatisierte Auswertungsprogramme erforderlich.

Die Möglichkeiten zur Verarbeitung und Speicherung von Daten haben sich in den vergangenen Jahren grundlegend verändert. Seit die Messfahrten durchgeführt wurden, die der VDV-Richtlinie zugrunde liegen, hat sich etwa die Speicherkapazität bei gleichen Kosten und Platzbedarf um den Faktor 10^6 vergrößert. Das große Potenzial, das die Simulation und Messung von Straßen- und Stadtbahnen für eine zielgerichtete Festigkeitsauslegung aufzeigt, hat zu einer verstärkten wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit diesem Thema geführt, in die sich diese Arbeit einreihet.

1.3 Ziele und Aufbau der Arbeit

Die Arbeit knüpft in vielen Punkten an [Har12] an. Dort konnte gezeigt werden, dass es prinzipiell möglich ist, Wagenkastenbeanspruchungen mit Hilfe elastischer Mehrkörper-

systeme zu ermitteln, wenn das System Fahrzeug/Gleis ganzheitlich betrachtet wird. Dabei wurde ein fortschrittliches Verfahren zur Ermittlung von Spannungszeitverläufen – die Spannungssynthese – angewandt. Auch die vorliegende Arbeit erkundet die Potenziale einer ganzheitlichen Simulation und zeigt Möglichkeiten für eine gezielte und sichere Auslegung von leichten Schienenfahrzeugen auf. Hierbei sollen die in [Har12] geschaffenen Möglichkeiten zur Nutzung realer Gleislage und elastischer Wagenkästen in der Simulation weiter ausgebaut werden. Damit sie sich nahtlos in den jetzigen Fahrzeugentwicklungsprozess einreihen lässt, geht die Arbeit hinsichtlich der Spannungsermittlung einen Schritt zurück und zielt zunächst auf die Ermittlung zuverlässiger Lastannahmen, welche die Grundlage für die Festigkeitsauslegung bilden. Das Ziel ist dabei nicht etwa das Finden eines universellen Lastkollektivs für die Auslegung von Straßen- und Stadtbahnen, das es so nicht gibt, sondern das Aufstellen universeller Methoden und Werkzeuge zur Ermittlung, Absicherung, Ursachenerhebung und Bewertung von Lasten für individuelle Fahrzeugtypen in oft einzigartigen Gleisnetzen.

Die Arbeit ist hierzu in vier zentrale Teile gegliedert, welche die Kapitel 2 bis 5 bilden. Kapitel 2 beschreibt zunächst Mittel und Verfahren zur Messung von Fahrzeug und Gleis. Sie dienen zum einen der Ermittlung der wesentlicher Eingangsgrößen für die Lastsimulation und zum anderen der Analyse und dem Verständnis des Gesamtsystems Fahrzeug/Gleis. Dabei werden kurze und lange Messzeiträume und die ausschnittsweise sowie die vollständige Datenerfassung thematisiert. Die Aussagekraft einer einzelnen Fahrtmessung basiert erfahrungsgemäß auf der gründlichen Dokumentation aller bei einer solchen Kurzzeitmessung geltenden Bedingungen und Umstände. Langzeitmessungen gleichen in diesem Sinne zunächst hunderten bis tausenden undokumentierten Kurzzeitmessungen und ihre Auswertung ist entsprechend herausfordernd. Herangehensweisen zur Auswertung von Langzeitmessungen bilden daher einen Schwerpunkt des Kapitels. Die ganzheitliche Bewertung der Messdaten und ihre Nutzung in der Simulation setzen voraus, dass sich Daten aus Fahrzeugmessungen und Gleismessungen präzise zusammenführen lassen. Methoden zur Lösung dieser Aufgabe für unterschiedliche Messzeiträume bilden einen weiteren Schwerpunkt des Kapitels.

Kapitel 3 erläutert gängige Modellierungskonzepte für Straßen- und Stadtbahnen und deren Gleis und bewertet ihre Eignung für die Simulation von Lasten. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Modellierungstiefe der Wagenkästen und ihrer Lasteinleitungspunkte gelegt. Der Prozess zur Einbindung elastischer Wagenkästen in das Fahrzeugmodell wird erarbeitet und die Lasterfassung an den Wagenkastenschnittstellen systematisiert. Es wird gezeigt, wie sich die Modellbildung in einen bestehenden Fahrzeugentwicklungsprozess einbetten lässt.

In Kapitel 4 werden Simulationsverfahren dargestellt, um die Einsatzszenarien der Fahrzeuge realitätsnah abzubilden, dabei die aus der Messung gewonnenen Eingangs-

größen zu nutzen und fehlende Eingangsgrößen sinnvoll zu generieren. Mögliche Prozessketten werden aufgezeigt und ihre Beschreibung vereinheitlicht. Notwendige Schritte für die Automatisierung des Gesamtprozesses werden dargelegt.

Kapitel 5 befasst sich mit der Gewinnung von Auslegungslasten für die Fahrzeugentwicklung aus den gemessenen und simulierten Lastzeitreihen. Methoden zur Auswahl auslegungsrelevanter Lastkombinationen werden aufgestellt, die Zusammenführung und Bewertung von gemessenen und simulierten Last- und Beanspruchungszeitreihen wird beschrieben. Dabei werden Lösungsansätze für die Fragen erarbeitet, wie sich die Lastkollektive im Fahrzeugeinsatz zusammensetzen, welche Lastfälle einen signifikanten Einfluss auf die Lastkollektive haben, wo die Ursachen für diese Lastfälle liegen und ob sich ihre Häufigkeit gezielt reduzieren lässt. Insbesondere wird ergründet, wie sich Antworten auf diese Fragen durch die Auswertung von Langzeitmessungen an Fahrzeugen finden lassen. Hierfür wird eine neue Formulierung des Rainflow-Verfahrens aufgestellt, das im Gegensatz zu bestehenden Formulierungen ohne Informationsverlust, das heißt ohne Verlust der Wertgenauigkeit und der Zeitinformationen arbeitet. Es wird gezeigt, wie sich bestehende Auswertungsverfahren auf die mit ihm gewonnenen Rainflowtabellen anwenden lassen und welche neuen Möglichkeiten sich durch das Verfahren bieten. Eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf die weitere Forschung innerhalb des Fachgebiets schließen die Arbeit in Kapitel 6 ab.

Zur Gliederung werden drei Hierarchieebenen genutzt, zur schnelleren Orientierung sind innerhalb langer Abschnitte Schlüsselworte fett gesetzt. Ein Formel- und ein Abkürzungsverzeichnis befinden sich im Titelbogen, Literatur-, Abbildungs- und Tabellenübersichten im Anhang. Fachbegriffe und fremdsprachliche Begriffe sind kursiv gesetzt und werden lokal beschrieben.

2 Messung von Fahrzeug und Gleis

Messungen an Fahrzeugen bieten die Möglichkeit, die auf die Wagenkästen wirkenden Lasten und die von diesen hervorgerufenen Beanspruchungen direkt zu ermitteln. Mit Hilfe weiterer Größen aus der Fahrzeugmessung, wie dem Fahrzustand und dem Fahrzeugzustand, vor allem jedoch durch die Zuordnung einer Gleislagemessung, können den Lasten und Beanspruchungen später bestimmte Ursachen zugeordnet werden. Anhand dieser Informationen lassen sich zum einen die nötigen Bedingungen für das Erreichen hoher Lasten im Simulationsmodell gezielt abbilden, zum anderen können die Lasten auch durch konstruktive Gegenmaßnahmen von vornherein reduziert werden.

2.1 Fahrzeugmessung

Die Messung an Fahrzeugen dient der Gewinnung sicherer Lastannahmen in mehrfacher Hinsicht. Dies sind im einzelnen:

- (1) Die Bestimmung des Fahrzeugverhaltens für den Abgleich von Fahrzeugmodellen mit der Realität;
- (2) Die Erfassung des Fahrzeugbetriebs als Eingangsparameter für die Lastfallsimulation;
- (3) Die Messung von Strukturspannungen für das Führen eines praktischen Festigkeitsnachweises an bekannt hochausgelasteten Stellen;
- (4) Die Aufnahme des Fahrzeugzustands, um Ursachen hoher Strukturspannungen ermitteln zu können;
- (5) Die Ermittlung des Einflusses verschiedener Fahrzeugeinstellungen auf die Lasten.

Aus diesen Zielen ergibt sich eine starke Vorauswahl gesuchter Messgrößen. Dies sind insbesondere der Ort des Fahrzeugs, die Geschwindigkeit und Beschleunigung entlang des Gleises, der Zustand des Gesamtfahrzeugs, der Spannungszustand der Wagenkastenstrukturen sowie die an den Schnittstellen von Fahrwerk zu Wagenkasten sowie Wagenkasten zu Wagenkasten wirkenden Kräfte. Weiter von Bedeutung sind Beschleunigungen einzelner Bauteile, insbesondere jene unterschiedlich abgefederter Baugruppen

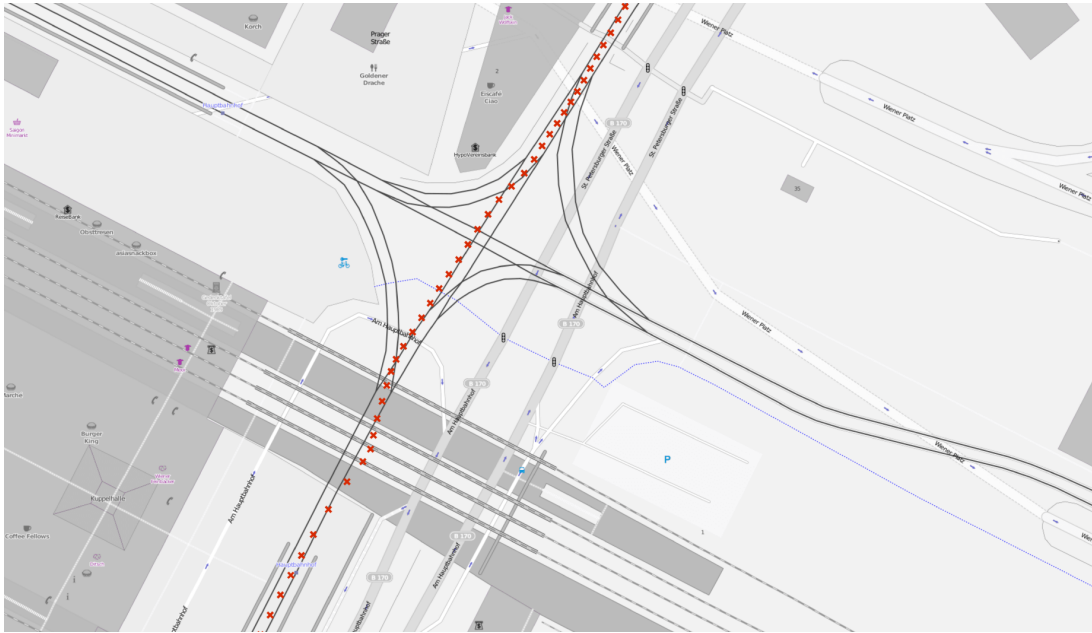


Bild 2.1: Typisches GPS-Positionssignal

wie Radsatzlager, Fahrwerksrahmen und Wagenkasten. Diese lassen Rückschlüsse auf die Weganregung über die einzelnen Federstufen sowie auf die resultierenden Gesamtkräfte zu. Im Folgenden sollen zunächst die einzelnen Messgrößen im Detail analysiert und verschiedene Formen der Messdurchführung behandelt werden.

2.1.1 Messung des Ortes

Straßen- und Stadtbahnen verkehren naturgemäß in einem urbanen Umfeld, in dem der Signalempfang von globalen Navigationssatellitensystemen wie GPS aufgrund von Gebäudeabschattungen, Unterführungen und Tunneln nur mit eingeschränkter Zuverlässigkeit und stark begrenzter Genauigkeit möglich ist. Ein typisches GPS-Positionssignal zeigt Bild 2.1. Mit Korrekturmaßnahmen wie der Nutzung ortsfester Referenzmesspunkte (wie bei differenziellem GPS, DGPS), lassen sich systembedingte niederfrequente Messfehler, etwa durch ionosphärische Störungen, Uhrenfehler und Bahnabweichungen, mit hohem Aufwand verringern [HWLW07].

Fehler, die allein auf schlechtem Signalempfang beruhen, etwa durch Gebäudeabschattung, sind jedoch mit ihnen nicht zu reduzieren. Fahrzeugbetreiber setzen daher oft auf andere Mittel zur Fahrzeugverortung, die, wie etwa Bakensysteme, meist abschnittsbasiert arbeiten. Für die Herstellung des Ortsbezugs bei Fahrzeugmessungen kommen solche infrastrukturseitigen Systeme allerdings nicht in Betracht. GPS-Empfänger sind in der Regel vom übrigen Messsystem losgelöste Geräte, die Nachrichten im *NMEA*-

Format an das eigentliche Messsystem senden, von dem sie ausgelesen und aufgezeichnet werden. Zwischen dem Kaltstart des Empfängers und der ersten berechneten Position vergehen auch bei vollem Empfang der Satellitensignale bis zu 20 Minuten, was neben anderen Faktoren in den niedrigen Übertragungsraten begründet liegt, mit denen die Satelliten die Parameter ihrer Umlaufbahn in den Lücken des eigentlichen Ortungssignals ausstrahlen. Ausführliche Informationen finden sich hierzu in der Spezifikation des zivilen GPS-Signals [Dod08], eine prägnante Erklärung in [Cla98].

Bei der Ortung von Straßen- und Stadtbahnen kommt zu den genannten Faktoren erschwerend hinzu, dass sich diese zu Messbeginn meist in Betriebshallen oder auf überdachten Stellflächen befinden, was den Signalempfang drastisch verschlechtert. Dies verhindert in der Regel, dass bei Fahrtbeginn bereits eine Position ermittelt ist und dass bei Fahrtende noch eine aktuelle Position festgestellt werden kann. Diese Besonderheit ist bei der Verarbeitung der Ortsdaten zu berücksichtigen, worauf unter anderem in Abschnitt 2.5.2 eingegangen wird.

Die Eigenschaft, dass die Empfänger Positionsnachrichten oft mit $f_{\text{NMEA}} = 1 \text{ Hz}$ zur Verfügung stellen und diese vom Messsystem oft ebenfalls mit einer Abtastrate von $f = 1 \text{ Hz}$ aufgezeichnet werden, hat in der Praxis regelmäßig zur Folge, dass einzelne Werte doppelt aufgezeichnet und dafür andere Werte übersprungen werden. Dies muss bei einer Auswertung der Ortsdaten beachtet werden. Möglich ist hier die Filterung mit einem gleitenden Mittelwert bei Verlust der höchsten Frequenzen. Zur Vermeidung von Phasendrehung sollte dazu ein gewichteter Mittelwert wie beispielsweise ein Binomialfilter [Aub96] genutzt werden.

2.1.2 Messung der Fahrgeschwindigkeit

Die Erfassung der Fahrgeschwindigkeit – der Geschwindigkeit des Wagenzuges entlang der Gleismittenachse – ist als grundsätzliche Anforderung an eine Fahrzeugmessung aufzufassen. Hierfür kommen prinzipiell zwei Wege in Frage: Die inertielle Messung der translatorischen Geschwindigkeit oder die Herleitung aus einer Drehzahl des Antriebssystems.

Bei der Geschwindigkeitsmessung mit Hilfe des **GPS-Signals** handelt es sich um eine inertielle Messung. Die Geschwindigkeit wird aus der Ortsdifferenz zweier aufeinanderfolgender Ortsbestimmungen ermittelt. Die Auswertung einer Langzeitmessung einer Straßenbahn im Rahmen dieser Arbeit zeigt bei $15,7 \cdot 10^6$ GPS-Geschwindigkeitswerten, die bei bekannt stehendem Fahrzeug aufgezeichnet wurden, eine mittlere Geschwindigkeit – also einen mittleren Fehler – von $0,042 \text{ m/s}$. Diese Änderung des Ortsfehlers in Höhe von $0,042 \text{ m}$ zwischen zwei Ortsbestimmungen ist prinzipiell als unabhängig von der bei Straßen- und Stadtbahnen ohnehin vergleichsweise geringen Fahrgeschwindigkeit

keit zu betrachten. Daher ist die Annahme begründet, dass hier auch beliebige GPS-Geschwindigkeitswerte größer Null einen mittleren absoluten Fehler von etwa $0,04\text{ m/s}$ aufweisen.

Selbstverständlich besitzen alle Fahrzeuge auch eigene Einrichtungen zur Geschwindigkeitsmessung, um das Signal für die Antriebsregelung zu nutzen und es am Fahrerpult anzuzeigen. Die Einbindung solcher **fahrzeugseitiger Geschwindigkeitssignale** in ein Messsystem ist jedoch nicht unproblematisch. Bei der Messung an älteren Fahrzeugen kommt in der Regel nur das Abgreifen des analogen Tachosignals in Frage. Praktisch handelt es sich um ein der Geschwindigkeit proportionales Spannungssignal oder Stromsignal, oder um ein frequenzmoduliertes Spannungs- oder Stromsignal.

Problematisch ist das Erkennen des Fahrzeugstillstands, da sich der Wert durch Übertragungs- und Messabweichungen nur im Bereich nahe Null bewegt, jedoch nie genau Null annimmt. Hier muss bei der Auswertung ein geeigneter Schwellwert gesetzt werden. Bei elektromagnetischen Einstreuungen muss gegebenenfalls mit deutlich höherer Abtastrate gearbeitet werden, sodass sich hochfrequente Störanteile über ein Tiefpassfilter wieder entfernen lassen.

Vorteile bringt das Auslesen eines digitalen Signals aus dem Fahrzeugbus, was bei allen neueren Fahrzeugen möglich ist, auch wenn dazu oft ein (unbegründet) hoher technischer Aufwand entsteht. Da die Fahrgeschwindigkeit von Zählgeber bis Messsystem digital verarbeitet wird, kann der Stillstand des Fahrzeugs zuverlässig erkannt werden. Dies stellt eine wesentliche Verbesserung sowohl gegenüber dem analogen Signal als auch gegenüber dem GPS-Signal dar.

Im Gegenzug unterliegt es bei Geschwindigkeiten größer Null grundsätzlich einem Fehler durch Schlupf, Gleiten und dem verschleißbedingt nur näherungsweise bekannten Laufkreisdurchmesser der Räder. Dieser Fehler wird fahrzeugseitig durch verschiedene Maßnahmen bestmöglich korrigiert, insbesondere werden die Laufkreisdurchmesser nach jeder Reprofilierung hinterlegt sowie die Daten aus angetriebenen und nichtangetriebenen Fahrwerken fusioniert. Bereits ein unausgeglichener Radverschleiß von 5 mm bewirkt jedoch einen relativen Fehler von etwa $1,5\%$. Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten erreicht das Signal daher nicht die Genauigkeit des GPS-Signals. Die ermittelten Werte legen dabei eine Geschwindigkeit um etwa 4 m/s nahe, ab dem das GPS-Signal mit seinem in erster Linie geschwindigkeitsunabhängigen Fehler genauer ist als das Bussignal mit seinem hauptsächlich geschwindigkeitsabhängigen Fehler.

Im Idealfall kann die Fahrgeschwindigkeit mit mehreren Verfahren gleichzeitig gemessen werden. Dann werden Verfahren zur **Fusion mehrerer Geschwindigkeitssignale** benötigt. Folgt man der Annahme, dass die Messung durch GPS bei höheren Geschwindigkeiten im Mittel genauere Werte liefert als das Fahrzeugsignal, während dieses vor allem eine hohe relative Genauigkeit zur wahren Geschwindigkeit aufweist, kann bei-

spielsweise folgender Algorithmus genutzt werden:

- (1) Suchen aller Zeitpunkte, zu denen die GPS-Geschwindigkeit v^{GPS} weniger als $r_{\text{lim}} = 10\%$ vom Bussignal v^{MVB} abweicht (Annahme gegebener Plausibilität) und zugleich größer als $v_{\text{lim}} = 10 \text{ m/s}$ ist (Annahme gegebener höherer Genauigkeit). Durch die zeitdiskrete Signalaufzeichnung zu den Zeitpunkten t_k mit $k \in \{1, \dots, m\}$ ergeben sich folglich die Zeitpunkte

$$t_l \text{ mit } l \in \left\{ k \mid v_k^{\text{GPS}} > v_{\text{lim}} \wedge \left| 1 - \frac{v_k^{\text{GPS}}}{v_k^{\text{MVB}}} \right| < r_{\text{lim}} \right\}. \quad (2.1)$$

- (2) Bilden des Verhältnisses beider Geschwindigkeiten zu jedem dieser Zeitpunkte und Multiplikation des gesamten Bussignals mit dem Median dieser Verhältnisse nach

$$v_k = v_k^{\text{MVB}} \cdot \text{Median}_l \left(\frac{v_l^{\text{GPS}}}{v_l^{\text{MVB}}} \right) \quad \text{für alle } k \in \{1, \dots, m\}. \quad (2.2)$$

Der Median [FKPT10] verringert hierbei gegenüber dem arithmetischen Mittelwert den Einfluss von Messausreißern des GPS-Signals auf das Ergebnis.

An dieser Stelle soll mit Bild 2.2 abschließend die Geschwindigkeitsermittlung eines beliebig gewählten Ausschnitts einer tatsächlichen Messung gezeigt werden. Ein aus dem Fahrzeugbus digital abgegriffenes Signal (grün) besitzt einen eindeutigen Nullwert bei Stillstand und einen konstanten Wert bei rein rollendem Fahrzeug. Das GPS-Geschwindigkeitssignal (dunkelrot) besitzt beide Eigenschaften nicht, jedoch zeigt es bei hohen Geschwindigkeiten einen deutlich anderen Wert an, der im Mittel als genauer angenommen werden kann. Blau dargestellt ist das nach der oben beschriebenen Methodik vereinte Signal, dass alle drei Eigenschaften aufweist. Gepunktet ist dasselbe Signal eingezeichnet, wenn es mit Hilfe eines später gezeigten Verfahrens über eine große und bekannte zurückgelegte Strecke (60 km) korrigiert wird. Es besitzt einen relativen Fehler in der Größenordnung von 0,001% und bestätigt die für höhere Geschwindigkeiten getroffenen Annahmen.

2.1.3 Erkennen der Bewegungsrichtung

Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge verfügen stets über Fahrerstände an beiden Fahrzeugenden. Hiervon ist entweder ein Fahrerstand als Hilfsfahrerstand ausgeführt, der lediglich zum zurücksetzen und rangieren dient (*Einrichtungsfahrzeuge* oder kurz *Einrichter*), oder aber beide Fahrerstände sind gleichwertig ausgeführt und erlauben ein reguläres Fahren in beide Fahrzeugsrichtungen (*Zweirichtungsfahrzeuge* oder kurz *Zweirichter*). In beiden Fällen muss von zwei möglichen Bewegungsrichtungen in Bezug zum

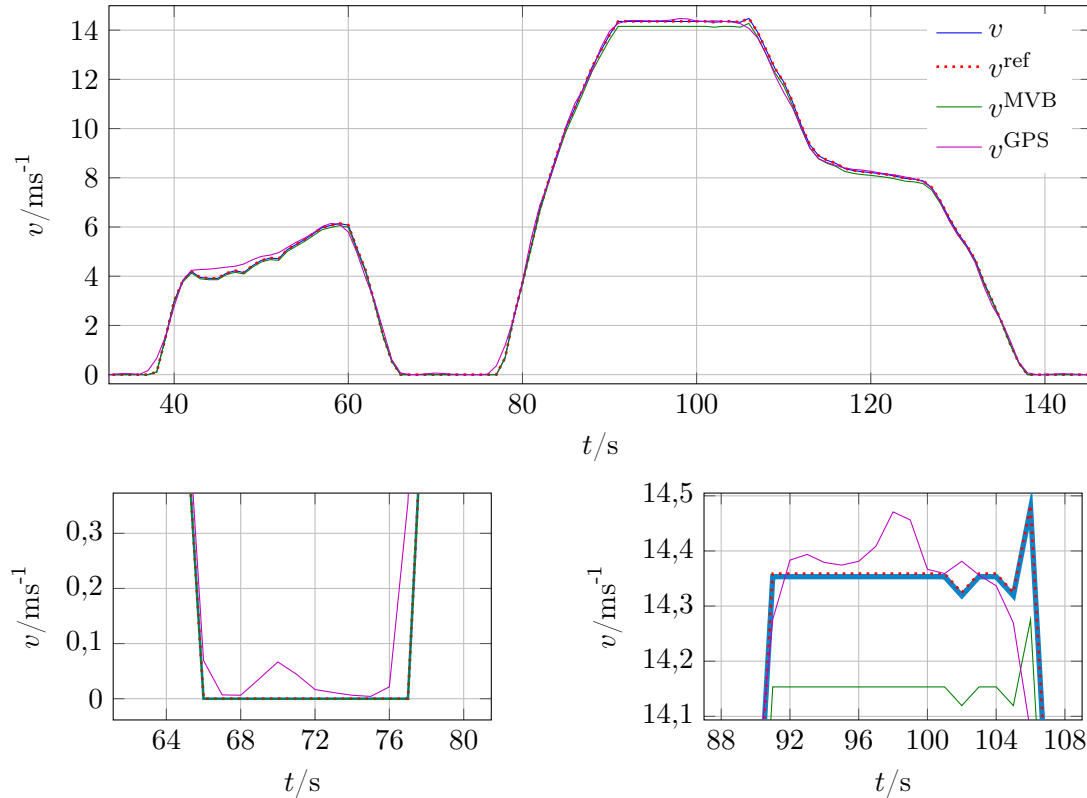


Bild 2.2: Vergleich unterschiedlicher Geschwindigkeitszeitsignale, Gesamtsignal (oben), Ausschnitte (unten)

Fahrzeug ausgegangen werden. In dieser Arbeit sind sie durchgängig als *Fahrzeugrichtungen* bezeichnet, um sie von den *Fahrtrichtungen* auf einem Gleis zu unterscheiden, die beispielsweise auch durch Durchfahren einer Gleisschleife wechseln können.

Nun muss bedacht werden, dass es anhand den Orts- und Geschwindigkeitsinformationen eines einzelnen GPS-Empfängers nicht möglich ist, die Fahrzeugrichtung zu identifizieren. Auch der Wechsel der Fahrzeugrichtung kann mit ihnen nicht zweifelsfrei erkannt werden, da im Stillstand – wo der Fahrzeugrichtungswechsel nur stattfinden kann – ihre relativen Fehler gegen unendlich streben. Erschwerend kommt hinzu, dass auch das fahrzeugeigene Geschwindigkeitssignal nur Betragswerte wiedergibt, unabhängig davon, ob es digital im Fahrzeugbus oder analog am Tachometer abgegriffen wird. Gleiches gilt für viele weitere Messwerte wie etwa Radsatzdrehzahlen.

In der Folge ist es bei Messungen notwendig, ein zusätzliches, geeignetes Signal aufzuzeichnen und auszuwerten, wenn – wie stellenweise in dieser Arbeit – die Fahrzeugrichtung und insbesondere der Fahrzeugrichtungswechsel, von Bedeutung ist. Ein unabhängig vom gemessenen Fahrzeugtyp erfolgreicher Ansatz ist die Auswertung eines oft ohnehin aufgezeichneten, niederfrequent arbeitenden Beschleunigungssensors in Fahr-

zeuglängsrichtung am Wagenkasten. Diese Auswertung ist nicht trivial, da die gemessene Beschleunigung neben der eigentlichen Fahrzeuglängsbeschleunigung auch Anteile der Fahrzeugquer-, der Fahrzeugvertikal- und der Erdbeschleunigung umfasst. Die Höhe dieser Anteile ist abhängig von der Abweichung der Ist- zur Solleinbaulage des Sensors und vom Nickwinkel des Wagenkastens aufgrund von Beladung und Gleisgradienten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde für die Auswertung folgender Algorithmus erstellt und mit der hier angegebenen Parametrierung genutzt:

- (1) Erkennen der Enden aller Standzeiten, deren Dauer einen Wechsel der Fahrzeugrichtung (des Fahrerstands) ermöglichen, zum Beispiel Stillstand über mehr als 10 Sekunden;
- (2) Jeweils Auslesen des Beschleunigungssignals $a_{x,k}$ um diesen Zeitpunkt, zum Beispiel ein 5 Sekunden Zeitfenster;
- (3) Jeweils Nullung dieses Beschleunigungsausschnitts mit dessen Startwert, um den statischen Anteil der Erdbeschleunigung auszugleichen, der durch Nicken des Wagenkastens bei Halt am Hang oder durch ungleichmäßige Beladung entsteht. Dieser kann bis zu etwa $a_{gx} = g \sin(\arctan 100\text{‰}) \approx 1 \text{ m/s}^2$ betragen;
- (4) Doppelte Integration des Beschleunigungsausschnitts, Betrachtung des Vorzeichens der resultierenden Wegstrecke;
- (5) Wechselt das Vorzeichen zwischen zwei betrachteten Beschleunigungsausschnitten, so wechselt während der dem zweiten Beschleunigungsausschnitt unmittelbar vorausgehenden Stillstandszeit die Fahrzeugrichtung.

Bild 2.3 zeigt beispielhaft zwei Kartenausschnitte einer Langzeitmessung eines Einrichtungsfahrzeugs, bei der die mit diesem Algorithmus detektierten Fahrzeugrichtungswechsel eingezeichnet sind. Ursache war hier das Drehen des Fahrzeugs über ein Gleisdreieck aufgrund von Baumaßnahmen. Der Algorithmus erkennt bei der testweisen Auswertung von 4510 h Messdaten 393 Fahrtrichtungswechsel an verschiedenen Stellen im Gleisnetz ohne einen erkennbaren Fehler.

2.1.4 Messung des Fahrzeugzustands

Losgelöst von der Betrachtung des Fahrzeugs in seiner Umwelt, also seiner Lage zum Weltkoordinatensystem und zum Gleis, besitzt das Fahrzeug einen inneren Fahrzeugzustand. Dieser Fahrzeugzustand ist maßgeblich bestimmt durch die Lage (und die Geschwindigkeit) der Wagenkästen zueinander und die Lage der Wagenkästen zu ihren

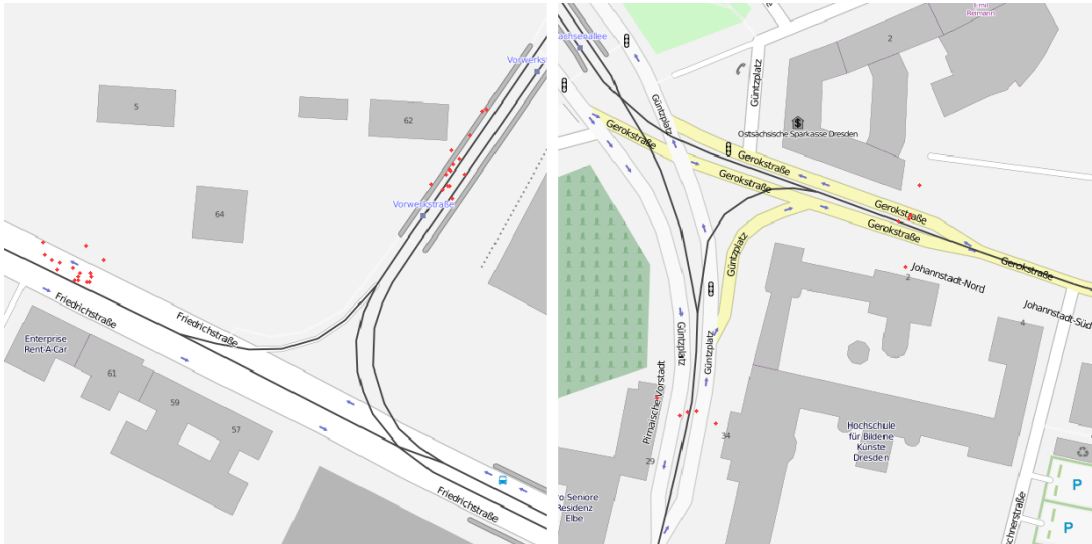


Bild 2.3: Erkannte Fahrtrichtungswechsel (rot) bei einer Langzeitmessung eines Einrichtungsfahrzeugs, trotz Messung des reinen Geschwindigkeitsbetrags

Fahrwerken. Er lässt sich folglich durch die Messung der Gelenkwinkel, gegebenenfalls der Gelenkwege, sowie der vertikalen und horizontalen Sekundärfederwege bestimmen. Die Messung dieses Zustandsvektors ermöglicht später entscheidende Rückschlüsse, wenn beispielsweise hohe Beanspruchungen der Wagenkastenstruktur gemessen werden. Dann ist es unter anderem von Bedeutung, inwieweit Gelenkwege, Gelenkwinkel und Federwege ausgeschöpft und ob deren Anschläge erreicht wurden.

Die Sensorik zur Erfassung dieser Größen muss insbesondere bei Langzeitmessungen außerordentlich robust gegen Umwelteinflüsse sein. Gerade im Fahrwerksbereich muss sie dabei auch sehr kompakt sein, da meist nur wenig Bauraum existiert, der nicht durch die Fahrwerkskinematik ausgeschöpft wird oder der nicht außerhalb des lichten Raumes der Infrastruktur liegen. Abnutzung, Beschädigung oder Verlust von Sensorik sind im Fahrwerksbereich daher praktisch nicht auszuschließen, was je nach Ziel der Messung dem Einsatz besonders kostspieliger Sensorik entgegensteht.

Die Messung der Wege erfolgt mit Hilfe von Wegebern, die Messung von Winkeln mit Hilfe von Weg- oder Winkelgebern. Wie zum Beispiel Seilzugsensoren arbeiten sie im einfachsten Fall mechanisch und messen potenziometrisch. Dort, wo mechanische Geber nicht die nötige Robustheit gegen mechanische Einwirkungen und Umwelteinflüsse aufweisen, also insbesondere im Fahrwerksbereich, bieten sich berührungslose Messverfahren an, zum Beispiel basierend auf Ultraschalllaufzeitmessung gegen orthogonale Flächen oder induktive Feldmessung gegen leitende Flächen. Bild 2.4 zeigt zwei Typen solcher Sensoren im Praxiseinsatz. Eine optische Messung, einbezüglich der Messung von Laserlaufzeit, scheidet durch deren Verschmutzungsanfälligkeit aus.



Bild 2.4: Einsatz von Weggebern auf Basis induktiver Feldmessung zur Erfassung der Primärfederwege (a), auf Basis von Ultraschalllaufzeitmessung zur Erfassung der Sekundärfederwege (b)

Straßen- und Stadtbahnen werden häufig an Gleichspannungsnetzen in der Größenordnung von 1 kV betrieben. Dies erfordert hohe Leitungsströme, welche durch die örtliche Trennung der beiden Pole Oberleitung und Schienen nicht so geführt werden können, dass der Strom parallel laufender Leitungen in Summe Null wird. Vor allem in Nähe der Rückleiter sowie naturgemäß auch im Bereich der elektrischen Fahrmotoren treten starke elektromagnetische Felder auf, die bei der Wahl und der Platzierung der Sensorik zu berücksichtigen sind. Hiervon abgesehen ist die Messung des Fahrzeugzustands insgesamt betrachtet unproblematisch und gut beherrschbar.

2.1.5 Messung von Dehnungen und Strukturspannungen

Der Spannungszustand der Wagenkastenstruktur kann nicht direkt gemessen werden, jedoch die damit einhergehende Verformung. Diese kann punktuell mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen erfasst werden. Dehnungsmessstreifen besitzen eine elektrisch leitende Gitterstruktur mit definiertem ohmschen Widerstand. Sie werden mit einer harten Klebverbindung direkt auf die Struktur appliziert. Dehnungen der Wagenkastenstruktur führen zu einer Längenänderung des Messgitters und damit zu einer der Dehnung proportionalen Widerstandsänderung.

Elektrische Widerstände und insbesondere Widerstandsänderungen lassen sich durch Schaltungen wie der WHEATSTONESCHEN Messbrücke [Nor12] sehr genau bestimmen. Nach diesem Prinzip arbeiten auch heutige auf die Dehnungsmessung ausgelegte Analog-Digital-Wandler. Im einfachsten Fall wird der zu messende Dehnungsmessstreifen im Wandler mit drei konstanten Ergänzungswiderständen zur *Viertelbrücke* verschaltet. Wird die Messbrücke mit einer Eingangsspannung gespeist, kann ihre dann zur Dehnung

proportionale Ausgangsspannung analog-digital gewandelt und aufgezeichnet werden. Indem im Messkabel eine Speiseleitung, eine Fühlerleitung und ein oder zwei Brückenleitungen der Messbrücke getrennt bis an den Dehnungsmessstreifen geführt werden, kompensieren sich die Leitungswiderstände des Kabels.

Die Messung mit Dehnungsmessstreifen wird in zweifacher Hinsicht von der Temperatur beeinflusst. Zum einen ist der elektrische Widerstand selbst temperaturabhängig – weswegen üblicherweise Dehnungsmessstreifen aus Konstantan eingesetzt werden. Zum anderen dehnt sich das Grundmaterial mit steigender Temperatur aus, wodurch eine Dehnung gemessen wird, ohne dass eine Beanspruchung vorliegt. Beide Effekte heben sich auch bei optimaler Auslegung nur teilweise auf. Um den Temperatureinfluss besser zu kompensieren, sind daher weitere Maßnahmen erforderlich. Zum Beispiel kann dies durch die Anordnung eines zusätzlichen, dehnungsfreien, rein temperaturbeanspruchten Dehnungsmessstreifens auf gleichem Werkstoff und in unmittelbarer Nähe zum eigentlichen Dehnungsmessstreifen erreicht werden, der zusammen mit zwei konstanten Ergänzungswiderständen im Messgerät eine *Halbbrücke* bildet.

Wagenkastenstrukturen von Straßen- und Stadtbahnen sind im Allgemeinen aus Stahl oder Aluminium gefertigt und besitzen im Bereich der zulässigen Lasten linearelastisches Verhalten. Unter Annahme einachsigen Zugs gilt nach dem HOOKSCHEN Gesetz [Hoo78] der lineare, vom Elastizitätsmodul E abhängige Zusammenhang $\sigma = E \cdot \varepsilon$ zwischen Dehnung ε und Spannung σ . In der Praxis wird oft vereinfacht von einachsigem Zug ausgegangen, beispielsweise wenn die Normalspannung senkrecht einer Schweißnaht gesucht ist. Bild 2.5 zeigt eine solche Messstelle. Hilfreiche Empfehlungen zur Positionierung einfacher Dehnungsmessstreifen für den praktischen Ermüdungsfestigkeitsnachweis an Fugestellen gibt hierbei [En10]. In anderen Fällen kann mit Hilfe spezieller, übereinander angeordneter und dadurch mehrachsig wirkender Dehnungsmessstreifen der

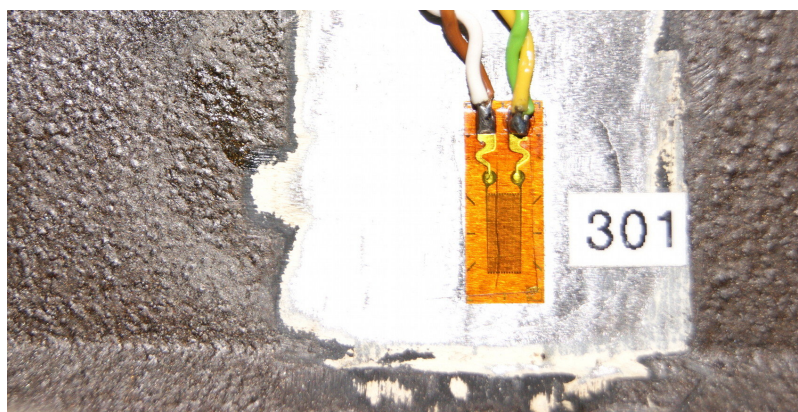


Bild 2.5: Dehnungsmessstreifen zur Messung der Normalspannung senkrecht einer Schweißnaht, Untergestell eines Stadtbahnwagens

vollständige ebene Dehnungszustand aus Schubdehnung und Normaldehnungen gemessen werden. Der allgemeine, räumliche Dehnungszustand des Vollmaterials bleibt jedoch auch dann verborgen.

Dehnungsmessstreifen messen die Dehnung ausgehend von einer zum Zeitpunkt der Applizierung herrschenden Vordehnung des Werkstoffs. Diese Vordehnung hängt von der Materialbearbeitung und den eingesetzten Fügeverfahren bei der Fertigung sowie der Belastung mit dem Eigengewicht der Struktur ab. Für die Festigkeitsauswertung stellt die Unkenntnis der Vordehnung – und damit einhergehend der Vorspannung – ein Problem dar. Es existieren verschiedene Methoden zur Ermittlung des Werts [Hof87], die in der Regel zu einer Schädigung des Bauteils führen, zum Beispiel wenn sie ein Anbohren des Materials erfordern [Astm13]. Sie sind daher im untersuchten Anwendungsfall auszuschließen. Wie weiter unten in Abschnitt 2.2.1 gezeigt, kann eine pragmatische Näherung auch im Zuge der Fahrzeugbeladung erfolgen. Ebenfalls hilfreich kann eine Berechnung der aus dem Eigengewicht der Struktur verursachten Vordehnungen sein, sie führt jedoch zur ungewollten Vermengung von Berechnungs- und Messwerten.

2.1.6 Messung von Schnittlasten

Für die Auslegung von Wagenkastenstrukturen ist es von zentraler Bedeutung, welche äußeren Lasten (Kräfte und Momente) auf sie wirken. Diese greifen an definierten Schnittstellen an, die den Wagenkasten zu anderen Bauteilen und der Umgebung abgrenzen, und werden daher auch als Schnittlasten bezeichnet. Kritische Schnittlasten werden oft an der Fahrwerksanbindung und den Wagenkastengelenken übertragen. Weitere Schnittufer sind beispielsweise auch Anhebestellen für Hubanlagen und Lager von Schlingerdämpfern. Mit Ausnahme der Seitenwindlast ist die Lasteinleitung weitgehend punktuell. Die Summe aller Schnittlasten entspricht zu jedem Zeitpunkt dem Produkt von Wagenkastenbeschleunigung und -tragheit.

Die direkte Messung der wirkenden Schnittlasten ist nur bedingt möglich. Ein Einbau eigenständiger Kraftaufnehmer wie zum Beispiel Kraftmessdosen ist aus Gründen des Bauraums und der Fahrzeugfunktionalität in der Praxis nicht möglich. Die Schnittlasten können an zahlreichen Stellen jedoch durch die Bestimmung von Bauteilreaktionen gemessen werden.

An Lenkerstangen kann so mit einer Verschaltung von vier Dehnungsmessstreifen zur *Vollbrücke* ein zur Druck-/Zugkraft proportionales Signal gemessen werden. Biege- und Torsionslasten werden von der Messbrücke in idealer Betrachtung kompensiert. Da diese Kompensation durch Geometriefehler bei der Applikation und Abweichungen unter den einzelnen Dehnungsmessstreifen erheblich gestört werden kann, ist es wichtig sicherzustellen, dass am Bauelement keine wesentlichen Biege- und Torsionslasten auftreten. An

Dämpfern kann eine Druck-/Zugkraftmessung durch eine Brückenschaltung am Lagerauge mit geringen Einbußen der Genauigkeit ebenfalls erreicht werden. Notwendig ist in jedem Fall die Kalibrierung des jeweiligen Bauteils, also die Ermittlung des Übertragungsfaktors zwischen aufgebrachter Last und gemessenem Signal. Eine rechnerische Ermittlung des Übertragungsverhaltens ist in der Praxis nicht zuverlässig möglich.

Auch an anderen Schnittstellen ist eine Kraftmessung auf indirektem Weg möglich. Die über die Sekundärfedern eingeleitete Vertikalkraft lässt sich beispielsweise aus dem gemessenen Federweg mit Hilfe der Steifigkeitskennlinie berechnen. Dies setzt eine separate Messung der Kennlinie voraus, die in der Regel im Rahmen des Typtests der Sekundärfeder stattfindet.

Die größte Komplexität besitzt die indirekte Kraftmessung an sehr steifen und weitgehend geschlossenen Bauteilen wie den unteren Wagenkastengelenken. Hier werden alle drei Kraftkomponenten und abhängig vom Lagertyp zusätzlich auch Momente übertragen. Zur Messung können im Bereich der Gelenkkonsole n Dehnungsmessstreifen appliziert werden. Durch die Bestimmung der Empfindlichkeiten ihrer Signale ε_i auf komponentenweise in das Gelenk eingeleitete Lasten f_j kann zum Beispiel im Rahmen der statischen Fahrzeugmessung eine Übertragungsmatrix \mathbf{U} bestimmt werden, für die

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}}_{\boldsymbol{\varepsilon}} = \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{\Delta\varepsilon_1}{\Delta F_x} & \frac{\Delta\varepsilon_1}{\Delta F_y} & \frac{\Delta\varepsilon_1}{\Delta F_z} & \frac{\Delta\varepsilon_1}{\Delta M_x} & \frac{\Delta\varepsilon_1}{\Delta M_y} & \frac{\Delta\varepsilon_1}{\Delta M_z} \\ \frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta F_x} & \frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta F_y} & \frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta F_z} & \frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta M_x} & \frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta M_y} & \frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta M_z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\Delta\varepsilon_n}{\Delta F_x} & \frac{\Delta\varepsilon_n}{\Delta F_y} & \frac{\Delta\varepsilon_n}{\Delta F_z} & \frac{\Delta\varepsilon_n}{\Delta M_x} & \frac{\Delta\varepsilon_n}{\Delta M_y} & \frac{\Delta\varepsilon_n}{\Delta M_z} \end{pmatrix}}_{\mathbf{U}} \underbrace{\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix}}_{\mathbf{f}} \quad (2.3)$$

gilt. Die bei der Messfahrt gemessenen Dehnungen im Gelenkbereich lassen sich dann unter anderem über die Pseudoinverse nach MOORE/PENROSE dieser Übertragungsmatrix in die gesuchten Gelenkkräfte

$$\mathbf{f} = \mathbf{U}^+ \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.4)$$

umrechnen.

Alle bei den Messfahrten direkt wie indirekt erfassten Schnittkräfte müssen in das jeweils betrachtete Wagenkasten-Koordinatensystem umgerechnet werden. Dies geschieht, indem mit Hilfe des gemessenen Fahrzeugzustands (Abschnitt 2.1.4) eine zeitabhängige Drehmatrix gebildet und auf die gemessenen Schnittkräfte angewendet wird.

2.2 Einzelmessungen an Fahrzeugen

2.2.1 Statische Messungen

Statische Messungen am Fahrzeug dienen der Ermittlung von Struktur- und Gelenksteifigkeiten für den späteren Modellabgleich, wie in Bild 2.6 gezeigt, und der Kalibrierung von Messstellen für die dynamische Messung.

Die **Messung von Steifigkeiten** erfordert in allgemeiner Betrachtung das gleichzeitige Erfassen von Kraftänderungen und Wegänderungen (Verschiebungen) um eine Nulllage, um einen Arbeitspunkt oder über eine mögliche Wegstrecke. So ist die Messung der Torsionssteifigkeit eines einzelnen Wagenkastens möglich, indem dieser zunächst nivelliert auf vier Kraftmessdosen platziert wird, um dann an diesen vier Lagerstellen eine definierte Vertikalverschiebung vorzugeben. Aus der Veränderung der Lagerkräfte ist das Torsionsmoment auf den Wagenkasten zu ermitteln. Gemeinsam mit dem aus der Vertikalverschiebung resultierenden Verdrehwinkel ergibt sich so die Torsionssteifigkeit.

Werden Messfahrten mit beladenem Fahrzeug durchgeführt, bietet sich eine gute Möglichkeit für einen **Beladungsversuch**. Dabei wird der Beladungsvorgang der Zusatzgewichte schrittweise durchgeführt und die resultierenden Änderungen des Fahrzeugzustands, der Schnittkräfte und der Strukturbeanspruchung mit dem Messsystem erfasst. Hieraus lassen sich die folgenden Informationen gewinnen:

- Die bei jedem vollständigen Fahrgastwechsel zu erwartenden Beanspruchungs- und Lastamplituden an den Dehnungs- und Kraftmessstellen;
- Eine Näherung der mittleren statischen Beanspruchung an den Dehnungsmessstellen, die bereits durch das Leergewicht des Wagenkastens hervorgerufen wird. Hierfür muss die Dehnungsänderung während der Beladung gemessen und die Ausgangsdehnung nach

$$\varepsilon_{\text{leer}} \approx \frac{\varepsilon_{\text{beladen, rel}} - \varepsilon_{\text{leer, rel}}}{m_{\text{Zuladung}}} \cdot m_{\text{leer}}^{\text{WK}} \quad (2.5)$$

in Gegenrichtung extrapoliert werden, bis auch das Leergewicht des Wagenkastens kompensiert ist. Dieses Vorgehen ist vorrangig für Messstellen im Untergestell sinnvoll, während die Eignung für andere Messstellen dezidiert betrachtet werden muss;

- Die Kalibrierung von Messstellen für die vertikale Schnittkraftmessung anhand der Gewichtskraft $m_{\text{Zuladung}} \cdot g$, möglich an Wagenteilen, die ausschließlich auf benachbarten Wagenteilen gelagert sind (*Sänften*);

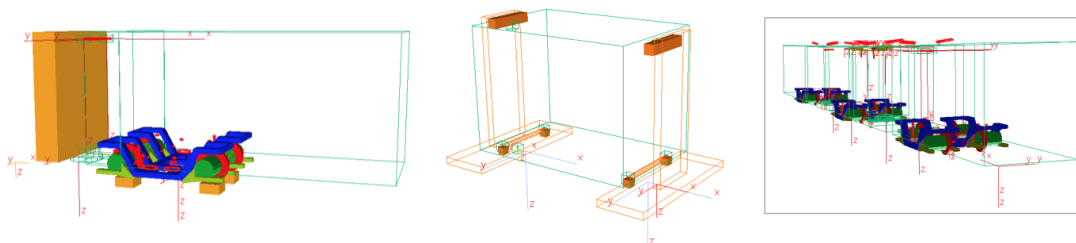
- Federsteifigkeiten der Primärfederung und Sekundärfederung, genauer die Stützstellen ihrer Kraft-Weg-Kennlinie; Hierfür müssen lediglich die jeweiligen Federwege zu den Beladungsschritten erfasst werden;
- Höhe der verbleibenden Federwege zu Anschlägen und gegebenenfalls vorhandenen zweiten, progressiven Federstufen bei beladenem Fahrzeug.

Beim **Verwindungsversuch** wird das Fahrzeug einer definierten Gleisverwindung ausgesetzt, zum Beispiel durch Einbringen von Beilagen zwischen Rädern und Schiene. Dies kann stufenweise und für verschiedene Verwindungsbasen geschehen. Für die Wagenkastenbelastung ist hier der einfache und mehrfache Fahrwerksabstand maßgeblich. Resultierende Vertikalwege am Wagenkasten, insbesondere an den Fahrwerken und den Endportalen, können gemessen werden. Die an den Fahrwerken eingeleiteten Torsionsmomente lassen sich entweder durch die Messung der Federwege bei bekannter Kennlinie der Federsteifigkeit erfassen, oder indem der Versuch auf einer Radlastwaage durchgeführt und die Radlastdifferenzen ermittelt werden.

Aus den Torsionsmomenten und Verschiebungen lassen sich die Torsionssteifigkeiten der Wagenkästen und der Gelenkübergänge getrennt voneinander bestimmen. Belastung und Beanspruchung des Gesamtfahrzeugs für typische Gleisverwindungen sind mit diesem Versuch direkt ermittelbar. Weiter kann erfasst werden, bei welcher Gleisverwindung bestimmte Vertikalansschläge erreicht und Dämpferwege ausgeschöpft sind.



(a) Messung von Anbindungs-, Wagenkasten- und Gesamtfahrzeugsteifigkeiten



(b) Abgleich der Modellparameter im virtuellen Versuchsstand

Bild 2.6: Statische Fahrzeugmessung

2.2.2 Dynamische Messungen

Ziele der dynamischen Fahrzeugmessung sind die Datengewinnung für die Simulationsdurchführung, die Modellvalidierung und die Verifikation der Berechnungsergebnisse, die Führung eines experimentellen Festigkeitsnachweises sowie die Variation und die Optimierung von Fahrzeugkonfiguration und -einstellung. Für die Datengewinnung zur Modellvalidierung bietet es sich an, Fahrten auf kurzen, beanspruchungsintensiven Streckenabschnitten mit den folgenden, unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchzuführen:

- Dynamisches Geschwindigkeitsprofil eines routinierten Fahrers zur Abbildung der real auftretenden Lasten;
- Konstante Schrittgeschwindigkeit (ca. 1-2 m/s) zum Erfassen der quasistatischen Lastkomponenten, die zum Beispiel durch Gleisverwindung und Gelenkkinematik verursacht werden;
- Konstante, höchste auf dem jeweiligen Abschnitt durchgängig zulässige Geschwindigkeit zum Erfassen der dynamischen Lastkomponenten aus der Quer- und Vertikaldynamik.

Sind Eingangsdaten für die Simulation zu gewinnen oder ein experimenteller Festigkeitsnachweis zu führen, muss ein repräsentativer Ausschnitt des gesamten Streckennetzes befahren werden. Um sich dem Betriebsspiegel des regulären Fahrgastbetriebs anzunähern, sollte mit der dort üblichen Geschwindigkeit gefahren und an Haltestellen gestoppt werden. Messfahrten zur Lastermittlung sollten stets mit beladenem Fahrzeug durchgeführt werden. Hierbei ist die sogenannte 2/3-Beladung nach [Bos87] maßgeblich. Soll auch der Einfluss der Beladung festgestellt werden, ist die Referenzmessung am Leerfahrzeug erforderlich.

2.3 Langzeitmessung von Fahrzeugen

2.3.1 Umsetzbarkeit in der Praxis

Wie einleitend in Abschnitt 1.2 festgestellt, besitzt die Langzeitmessung von Fahrzeugen große Vorteile hinsichtlich des möglichen Erkenntnisgewinns und der Wirtschaftlichkeit von Fahrzeugmessungen. Ihr Hauptvorteil ist aber, dass kein künstlicher, mit vielen Annahmen behafteter Betrieb, sondern der tatsächliche Einsatz des Fahrzeugs erfasst wird. Für eine Langzeitmessung muss die Messtechnik im Gegensatz zu herkömmlichen Messfahrten außerhalb des Fahrgastraums und rückwirkungsfrei zu den Fahrzeugsystemen installiert werden. Eine solche Installation ist in größerem Umfang praktisch nur

ab Werk durchführbar. Die Umsetzbarkeit von Langzeitmessungen in der Praxis soll im Folgenden anhand der Dresdner Messstraßenbahn gezeigt werden.

Bei der **Messstraßenbahn Dresden** handelt es sich um einen Langzeitmessträger, der im Netz Dresden im regulären Fahrgastbetrieb eingesetzt wird [HBSS09]. Er wurde im Jahr 2009 als Gemeinschaftsprojekt von TU Dresden, Dresdner Verkehrsbetriebe, Bombardier Transportation und sieben weiteren Partnern aus Industrie und Wissenschaft realisiert und seitdem betrieben [BHZD10]. Das Messfahrzeug ist eine Niederflurstraßenbahn vom Typ Bombardier Flexity Classic NGT-D8DD, dargestellt in Bild 2.7. Sie besitzt drei Wagenteile, wobei Kopf- und Endwagen jeweils über zwei klassische Drehgestelle verfügen. Der Mittelwagen ist als *Sänfte* ausgeführt, die die beiden anderen Wagenteile verbindet und nur auf diesen gelagert ist. Die Straßenbahn wurde während der Serienfertigung mit dem Messsystem ausgestattet.

Tabelle 2.1 zeigt auf, welche Signale während der Langzeitmessung aufgezeichnet werden und gibt einen Überblick über die genutzte Sensorik. Diese befindet sich am führenden Triebdrehgestell sowie an allen drei Wagenkästen. Die analogen Sensorsignale werden mit Hilfe dreier modularer Datenaufzeichnungsgeräte digitalgewandelt und aufgezeichnet. Diese sind untereinander synchronisiert und schreiben Messdateien, die jeweils die Signale gleicher Abtastrate über die Länge von einer Minute enthalten. Ein Industrie-PC sammelt diese Minutendateien über ein Ethernet-Netzwerk und legt sie auf einem persistenten Datenspeicher ab. Der Industrie-PC ist zudem unidirektional an den Fahrzeugbus (*Multifunction Vehicle Bus*, MVB) angebunden und liest eine Vielzahl der im Fahrzeugsystem bereits verfügbaren Signale aus und zeichnet diese auf gleiche Weise auf. Insgesamt werden durch das Messsystem 118 Signale mit in Summe etwa 30 000 Abtastwerten pro Sekunde aufgezeichnet.



Bild 2.7: Die Messstraßenbahn Dresden

Tabelle 2.1: Messstraßenbahn Dresden – Sensorsignale für Drehgestell, Kopfwagen, Mittelwagen (Sänfte) und Endwagen, sowie Signale des Fahrzeugbus

	Messgröße	Richtung	Kanäle	Messprinzip	f_s/Hz
Triebdrehgestell 1	Beschl. Radsatzlager	triaxial	3	piezoelekt.	2k
	Beschleunigung Rahmen	triaxial	3	piezoelekt.	2k
	Beschleunigung Anbauteil	triaxial	3	piezoelekt.	2k
	Primärfederweg	lateral	1	induktiv	500
	Primärfederweg	vertikal	4	induktiv	500
	Sekundärfederweg	vertikal	2	Ultraschall	500
	Sekundärfederweg	lateral	1	Ultraschall	500
	Nickweg Rahmen	vertikal	1	Ultraschall	500
	Ausdrehweg Rahmen	lateral	1	Ultraschall	500
	Außentemperatur		1	Pt100	1
Kopfwagen	Beschl. Untergestell	triaxial	6	kapazitiv	200
	Beschl. Innenraum	lateral	1	kapazitiv	200
	Beschl. Portalbereich	triaxial	3	kapazitiv	200
	Dehnungen Untergestell	einachsig	6	DMS-Halbbr.	200
	Dehnungen Seitenwand	einachsig	4	DMS-Halbbr.	200
	Dehnungen Portalbereich	einachsig	2	DMS-Halbbr.	200
	Gerätetemperatur		3	Pt100	1
	Position inertial		3	GPS	1
	Geschwindigkeit inertial		2	GPS	1
	Datum/Zeit, Metadaten		7	GPS	1
	Nickweg oberes Gelenk	longit.	1	Seilzug	200
	Kraft oberes Gelenk	lateral	1	DMS-Vollbr.	200
Mittelw.	Beschl. Untergestell	triaxial	3	kapazitiv	200
	Dehnungen Untergestell	einachsig	2	DMS-Halbbr.	200
	Dehnungen Portalbereich	einachsig	1	DMS-Halbbr.	200
	Dehnungen Seitenwand	einachsig	1	DMS-Halbbr.	200
E.	Dehnungen Untergestell		2	DMS-Halbbr.	200
Fahrzeugbussignale	Fahrgeschwindigkeit		3	MVB	1
	Motordrehzahl		6	MVB	1
	Motorsolldrehmoment		3	MVB	5
	Motoristdrehmoment		3	MVB	5
	Fahrdrachtspannung		1	MVB	5
	Gesamtfahrzeugstrom		1	MVB	5
	Zwischenkreisspannung		3	MVB	5
	Zwischenkreisstrom		3	MVB	5
	Zwischenkreisleistung		3	MVB	5
	Fahrmotorleistung		3	MVB	5
	Bremsstellerleistung		3	MVB	5
	Temperatur Leistungsel.		12	MVB	1
	Magnetschienenbremse		2	MVB	1
	Zustand Auf-/Abrüstung		4	MVB	1
Σ			118		30k

Fremdgespeiste Sensoren sind mit einem gemeinsamen, separaten Sicherungsautomaten an die geschaltete Spannungsversorgung des Fahrzeugs angeschlossen und werden demnach hart zu- und abgeschaltet, wenn das Fahrzeug aufgerüstet (eingeschaltet) beziehungsweise abgerüstet wird. Die übrigen Messgeräte sind über einen eigenen Sicherungsautomaten und über ein Zeitrelais, dessen Zustand von der geschalteten Spannungsversorgung abhängig ist, an die ungeschaltete Batteriespannung des Fahrzeugs angeschlossen. Sie sind auf diese Weise von den Fahrzeugsystemen vollständig unabhängig, werden aber dennoch mit dem Aufrüsten des Fahrzeugs gestartet und können in einer definierten Zeitspanne nach dem Abrüsten des Fahrzeugs geordnet herunterfahren.

Die Annahme, dass das Messsystem auf diese Weise etwa einmal am Tag neugestartet und dabei bereinigt wird, wurde in der Praxis widerlegt. Die längste Aufzeichnung der Messstraßenbahn betrug 136 h, als das Fahrzeug wegen starkem Frost [Wol14] in der Betriebsruhe nicht abgerüstet wurde. Es ist schwierig aber erfolgversprechend, bei der Auslegung eines Langzeitmesssystems möglichst keine Annahmen über den Messträger zu treffen, die keine technisch gesicherten Eigenschaften des Gesamtsystems widerspiegeln.

2.3.2 Herangehensweisen bei der Datenauswertung

Bei Langzeitmessungen entstehen große Datenmengen. Ihre Auswertung muss daher folgenden Anforderungen genügen:

- (1) Automatisierte & robuste Rohdatenverarbeitung;
- (2) Zielgerichtete Auswertungsalgorithmen;
- (3) Darstellbarkeit der Ergebnisse.

Der dritte Punkt ist dabei hervorzuheben. Es stellt erfahrungsgemäß eine große Herausforderung dar, Ergebnisse zu berechnen und diese auf wenige aussagekräftige Werte oder eine überschaubare Anzahl grafischer Darstellungen zu verdichten. Ergebnismatrizen sind dabei nur sinnvoll darstellbar, wenn sie zweidimensional oder in Ausnahmefällen dreidimensional sind. Die Auswertung muss daher die große zeitliche Dimension möglichst eliminieren oder sehr stark komprimieren. Weiter kann es hilfreich sein, die drei räumlichen Dimensionen zu verringern, zum Beispiel zur zweidimensionalen Projektion oder zur eindimensionalen Gleisachse.

Eine automatisierte Auswertung erfordert zunächst eine selbständige **Aufbereitung der Daten**, bestehend aus Plausibilitätsprüfung, Fehlerbereinigung und Filterung. Die Plausibilitätsprüfung wurde im vorliegenden Fall der Dresdner Messstraßenbahn in einem mehrstufigen Verfahren automatisiert und erprobt. Es ist auf das dort eingesetzte

Messsystem zugeschnitten, zeigt jedoch grundsätzliche und auf die Allgemeinheit übertragbare Fragestellungen auf.

Stufe 0

- Erfassen aller Hauptverzeichnisse im Messdatenpfad zur Ermittlung der verfügbaren Messtage (Fahrzeugausrüstung bis Fahrzeugabrüstung).
- Für alle erkannten Messtage:
 - Prüfen ob Unterverzeichnisse aller Aufzeichnungssysteme vorhanden;
 - Zählen der Messdateien in jedem Unterverzeichnis, bei Abweichung untereinander Ermittlung der kleinsten gemeinsamen Anzahl;
 - Prüfen der vorhandenen Messdateien auf durchgängige Nummerierung und definierte Mindestdateigröße;
 - Prüfen anhand der Dateianzahl ob Messung eine Mindestmessdauer erreicht (z. B. Messdauer $T > 20$ min).

Stufe 1

- Laden der Fahrgeschwindigkeit v^{MVB} aus dem Fahrzeugbus-Dateiensatz (Abtastrate $f_s = 1$ Hz);
- Laden der Signale dreier Längsbeschleunigungssensoren des führenden Wagenkastens, Filtern auf $f_{\text{TP}} = 0,5$ Hz, Herabtasten auf $f_s = 1$ Hz, Abziehen des jeweiligen Medianwerts, Mitteln der drei Kanäle zur Wagenkastenlängsbeschleunigung a_x ;
- Prüfen ob beide Datenreihen ohne Fehler geladen;
- Prüfen ob Datenreihen konsistent und synchron, durch Vergleich ihres empirischen Korrelationskoeffizienten mit einem definierten Grenzwert (z. B. $\text{Kor}_e(v^{\text{MVB}}, a_x) > 0,8$).

Stufe 2

- Laden der Koordinaten lat_k^{GPS} und lon_k^{GPS} und der Geschwindigkeit v^{GPS} des GPS;
- Prüfen ob GPS-Geschwindigkeit v_k^{GPS} konsistent mit MVB-Geschwindigkeit v_k^{MVB} anhand ihres Verhältnisses bei höheren Geschwindigkeiten;
- Bilden der kombinierten Fahrgeschwindigkeit v_k^{F} aus v_k^{MVB} und v_k^{GPS} nach Abschnitt 2.1.2;
- Berechnen des zurückgelegten Weges aus der Fahrgeschwindigkeit;
- Laden einer Wagenkastenquerbeschleunigung identisch dem in Stufe 1 genutzten, mittelnden Verfahren, als Vorbereitung für Stufe 3;
- Ermitteln der Fahrzeugrichtungswechsel nach Abschnitt 2.1.3, Erkennen seltener langer GPS-Ausfälle (Nullwerte über z. B. > 30 s), Schneiden der Mess-

datei an diesen Stellen in einzelne *Messläufe*;

○ Für alle Messläufe:

- Prüfen ob zurückgelegter Weg größer als definierte Mindestauswertungstrecke ist (z. B. $\Delta s > 1000$ m);
- Prüfen ob kombinierte Fahrgeschwindigkeit, Längsbeschleunigung und Ortsableitung der GPS-Koordinaten konsistent, durch Vergleich ihrer empirischen Korrelationskoeffizienten mit einem definierten Grenzwert (z. B. $> 0,8$).

Stufe 3

- Zuordnen des Gleises anhand eines hinterlegten Streckennetzes, der kombinierten Fahrgeschwindigkeit und der Wagenkastenquerbeschleunigung (vgl. späteren Abschnitt 2.5.2);
- Prüfen ob Gleiszuordnung durchgängig möglich;
- Korrigieren der zurückgelegten Strecke und der kombinierten Fahrgeschwindigkeit anhand der Gleiszuordnung;
- Prüfen ob Abweichung unkorrigierte/korrigierte Fahrgeschwindigkeit innerhalb definierter Grenzwerte.

Stufe 4

- Laden weiterer für die jeweilige Auswertung benötigter Daten (z. B. Dehnungsmessdaten);
- Prüfung ob Laden erfolgreich und Daten geeignete Plausibilitätskriterien erfüllen;
- Registrieren des gefundenen, durchgängig plausiblen Messlaufs in einer Ausgabetabelle.

Eine systematische Auswertungskette wie diese funktioniert in der Praxis prinzipiell sehr gut, da sie viele Annahmen absichert, die den mit den Daten durchgeführten Auswertungen zugrunde liegen. Als Folge dessen, dass sie sehr restriktiv ist, werden jedoch mitunter auch viele Daten aussortiert, die grundsätzlich brauchbar, aber nicht konform zu zunächst getroffenen Annahmen sind. Zwei konkrete Beispiele aus der Praxiserfahrung der Messstraßenbahn seien genannt:

- Trotz des hohen Synchronisierungsaufwands fehlen in seltenen Fällen in der ersten Messdatei der hochabgetasteten Signale einzelne Abtastwerte (z. B. 10 Werte eines 200 Hz-Signals). Wird dies nicht gesondert abgefangen, wird bei der automatischen Auswertung die Messung eines gesamten Tages verworfen. Lösung ist im speziellen Fall eine Tolerierung und Interpolation von Dateien, wenn weniger als 0,001% der Werte fehlen, unter Ausgabe einer Warnmeldung;

- Das GPS/GPRS-Modul lieferte nach einem Firmwareupdate etwa zwei Monate lang Längen- und Breitengrad mit Notation der Nachkommastellen in Bogenminuten statt Dezimalgrad. Die strikte Filterung nach den Grenzkordinaten des Streckennetzes führt zum Verwerfen der gesamten GPS-Informationen. Eine automatische Korrektur beim Einlesen der Rohdaten ist mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich.

Inkonsistenzen dieser Art sind nach den gesammelten Erfahrungen bei Langzeitmessungen zumindest in der Anfangszeit praktisch unvermeidbar. Ihre Ausprägung sind vielfältig und schwer vorhersagbar. Auswertungsketten müssen daher so gestaltet werden, dass sie auch unerwartete Inkonsistenzen zuverlässig erkennen. Sie müssen die Möglichkeit bieten, auf diese so zu reagieren, dass sie den automatischen Auswertungsprozess nicht stören und die erlangten Ergebnisse nicht unzulässig beeinflussen.

2.3.3 Speicherung von Zwischenergebnissen und Ergebnissen

Wie oben genannt, sind einzelne konkrete Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen einer Langzeitmessung nur möglich, wenn es gelingt, die großen Datenmengen auf kompakte Ausgaben zu reduzieren. Die Zwischenschritte dorthin lassen sich in übersichtliche Programmfunktionen aufteilen, die oft kettenartig aufgerufen werden. Benötigen einzelne Teilfunktionen erhebliche Rechenzeit, bietet es sich an, Zwischenergebnisse zu speichern. Dies gilt umso mehr, wenn eine Funktion das Ziel der starken Datenreduktion erfüllt, da die Zwischenergebnisse dann nur sehr wenig Speicherplatz benötigen. Werden Zwischenergebnisse von Hand verwaltet, entstehen praktisch unvermeidlich Versionskonflikte, sobald einzelne Funktionen im Gesamtprozess geändert werden.

Im Rahmen der Arbeit wurde für die Zwischenergebnisse daher ein unsortiertes Datenverzeichnis genutzt und für die Verwaltung folgende Anweisungsfolge in alle tendenziell rechenzeitaufwändige Programmfunktionen implementiert:

- (1) Bildung einer gemeinsamen Prüfsumme aller übergebenen Eingabegrößen zuzüglich einer Kennung der Funktion selbst und ihrer Versionsnummer. Nutzung des *Message-Digest Algorithm 5* (MD5) [Riv92; Tou95], aufgrund seiner sehr hohen Geschwindigkeit. Ungeachtet des Umfangs der Eingabegrößen entsteht eine eindeutige, skalare Prüfsumme, die hexadezimal als 32-stellige alphanumerische Zeichenfolge dargestellt wird. Kollisionen von Prüfsummen, das heißt gleiche Prüfsummen für unterschiedliche Eingaben, können in diesem Anwendungsfall nicht eintreten. Verarbeitet eine Funktion Dateien, wird der gesamte Dateiinhalt in die Prüfsumme einbezogen;

(2) Prüfung, ob im unsortierten Datenverzeichnis eine Ergebnisdatei mit dem Namen der in (1) berechneten Zeichenfolge abgelegt ist:

- Wenn ja, Auslesen und Ausgeben der Ausgabegrößen aus der Ergebnisdatei;
- Wenn nein, normaler Funktionsablauf, anschließend Speichern der Ausgabegrößen im unsortierten Datenverzeichnis unter der in (1) berechneten Zeichenfolge und Ausgeben der Ausgabegrößen.

Speicherprinzipien dieser Art werden allgemein als *Cache* bezeichnet. In der genannten Anwendung und Umsetzung sind mit geringem Aufwand erhebliche Zeitvorteile realisierbar. Unabhängig von seiner Komplexität dauert beispielsweise der wiederholte Plausibilitätscheck einer mehrstündigen Messreihe deutlich weniger als eine Sekunde, solange die zu prüfenden Daten bitgenau identisch geblieben sind. Dabei benötigt er lediglich 17 Byte Speicherplatz. Je 1 GByte Speicherplatz können nach diesem Beispiel die Ergebnisse von etwa $50 \cdot 10^6$ unterschiedlichen Funktionsaufrufen abgelegt werden, ohne dass für den Nutzer ein Verwaltungsaufwand entsteht. Besondere Geschwindigkeitsanforderungen an den Speicher bestehen nicht.

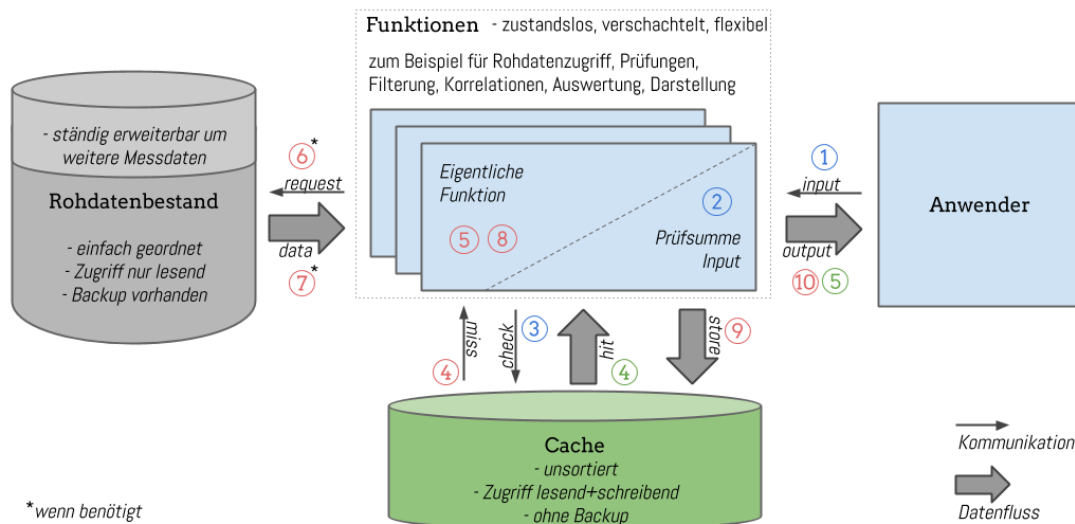


Bild 2.8: Verarbeitungskonzept für Langzeitmessungen

Es ergibt sich ein Datenfluss nach Bild 2.8, bei dem Funktionen stets zuerst ihre Ergebniswerte aus dem Cache zu ermitteln versuchen. Nur wenn dies nicht gelingt, werden zum Beispiel Rohdaten gelesen und neue Berechnungen ausgeführt. Wenn sich der Messdatenbestand wie während einer Langzeitmessung ständig um neue Datensätze erweitert, können durch das Vorgehen Auswertungen dennoch stets einheitlich auf den gesamten Datenbestand ausgeführt werden, da die an älteren Daten wiederholt stattfindenden Rechenschritte keine Rechenzeit mehr benötigen.

2.4 Gewinnung von Gleislagedaten

Mit der Messung des Fahrzeugs ist das Gesamtsystem Fahrzeug/Infrastruktur nur zur Hälfte zu begreifen. Für ein vollständiges Bild ist die Kenntnis der Gleislage unverzichtbar. Für die Gewinnung von Gleislagedaten kommen zum einen direkte, unmittelbare Messverfahren in Frage, zum anderen indirekte Verfahren, um die Gleislage beispielsweise aus einer normalen Fahrzeugmessung oder aus Gleisnetzplänen zu bestimmen.

2.4.1 Direkte Messverfahren

Als direktes Messverfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit das Messsystem *KRAB* [Kzv10] genutzt. Bei diesem handelt es sich um einen per Hand geschobenen Messwagen zur Erfassung von Gleislageparametern auf Basis des *Wanderschnenverfahrens*. Mit einer Abtastschrittweite von $\Delta s = 0,25\text{ m}$, festgelegt durch das Signal eines Wegmessrades, werden die *Primärgrößen*

- (1) Richtung,
- (2) Längshöhe,
- (3) Spurweite,
- (4) Überhöhung,
- (5) Längsneigung und
- (6) GPS-Position

erfasst. Richtung und Längshöhe werden dabei als horizontale bzw. vertikale Auslenkung (*Pfeilhöhen*) eines Messrades gegen die durch zwei Führungsräder auf der gleichen Schiene aufgespannte *Sehne* ermittelt. Die anderen Messgrößen werden durch Weg- und Neigungsgeber direkt erfasst. Der Messwagen kann für Meterspur und Regelspur konfiguriert werden. Durch eine angepasste, kurze Sehnenlänge von 1,9 m ist er besonders für die engen Kurvenradien in Straßenbahngleisnetzen geeignet. Die Stärken des Messsystems liegen in seiner flexiblen und schnellen Einsetzbarkeit.

In [Har12] wird die Datenverarbeitung im Detail behandelt, die nötig ist, um aus den gemessenen Werten die eigentliche Gleistrajektorie zu erhalten, beschrieben zum Beispiel durch die Sekundärgrößen

- (1) horizontale Gleiskrümmung κ^{hG} ,
- (2) vertikale Gleiskrümmung κ^{vG} ,
- (3) Spurweite g^{G} und
- (4) Überhöhung u^{G} .

Schlüsselschritte sind die Umrechnung der gemessenen Wegstrecke entlang der Schiene auf die Gleismittenachse, die Dekonvolution der Verläufe der Pfeilhöhen, die notwendig

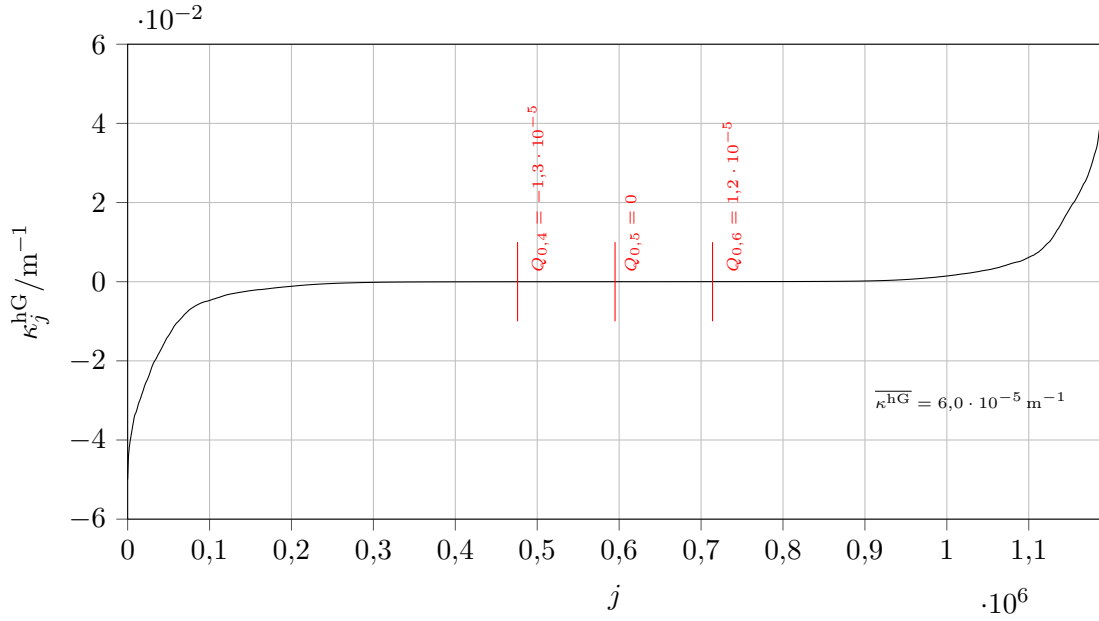


Bild 2.9: Aus einem Gleisnetzplan ermittelte horizontale Gleiskrümmungen für das Netz Dresden, Schrittweite 0,25 m, aufsteigend sortiert

ist, da neben dem eigentlichen Messrad auch beide Sehnerräder auf der zu messenden Trajektorie laufen, sowie eine Aufteilung in verschiedene Frequenzbänder, was in Kapitel 3 behandelt wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde für die Messdatenverarbeitung die in [Har12] entwickelte Software genutzt, wobei zusätzlich eine Erweiterung der automatisierten Korrektur der Gleislage implementiert wurde. Diese zusätzliche Korrektur basiert auf einer statistischen Auswertung der gemessenen Gleiskrümmungen. So strebt der jeweilige Median tatsächlicher Gleiskrümmungsverläufe gegen Null, wie Bild 2.9 für das Dresdner Gleisnetz veranschaulicht. Der Median der gemessenen Gleiskrümmung über einen hinreichend langen Gleisabschnitt entspricht daher der systematischen Messabweichung (dem Nullpunktversatz). Durch die Korrektur

$$\kappa_i^{\text{hG}*} = \kappa_i^{\text{hG}} - \text{Median}_{j=1}^n \kappa_j^{\text{hG}} \quad \text{und} \quad \kappa_i^{\text{vG}*} = \kappa_i^{\text{vG}} - \text{Median}_{j=1}^n \kappa_j^{\text{vG}} \quad (2.6)$$

für alle $i \in \{1, \dots, n\}$ wird daher sichergestellt, dass Gleisgeraden und Abschnitte ohne Vertikalkrümmung als solche erfasst werden.

Hingegen ist der arithmetische Mittelwert der Gleiskrümmung,

$$\overline{\kappa^{\text{hG}}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \kappa_i^{\text{hG}} \quad \text{bzw.} \quad \overline{\kappa^{\text{vG}}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \kappa_i^{\text{vG}}, \quad (2.7)$$

lediglich dann Null, wenn die Gesamtrichtungsänderung $\varphi_{\text{rel}}^{\text{h}}$ bzw. $\varphi_{\text{rel}}^{\text{v}}$, bei Integration nach der Rechteckformel

$$\varphi_{\text{rel}}^{\text{h}} = \sum_{i=1}^n \Delta s \kappa_i^{\text{hG}} \quad \text{bzw.} \quad \varphi_{\text{rel}}^{\text{v}} = \sum_{i=1}^n \Delta s \kappa_i^{\text{vG}}, \quad (2.8)$$

zwischen Messanfang und Messende ebenfalls Null beträgt, da aus Formel 2.7 und Formel 2.8

$$\overline{\kappa^{\text{hG}}} = \frac{\varphi_{\text{rel}}^{\text{h}}}{n \Delta s} \quad \text{bzw.} \quad \overline{\kappa^{\text{vG}}} = \frac{\varphi_{\text{rel}}^{\text{v}}}{n \Delta s} \quad (2.9)$$

folgt. Ist die horizontale Gesamtrichtungsänderung $\varphi_{\text{rel}}^{\text{h}}$ jedoch bekannt, da zum Beispiel das Ende der Messung auf dem Gegengleis des Startpunkts liegt ($\varphi_{\text{rel}}^{\text{h}} = \pm\pi$) oder eine Rundstrecke gemessen wurde ($\varphi_{\text{rel}}^{\text{h}} = \pm 2\pi$) kann die Abbildung der tatsächlichen Gleislage durch

$$\kappa_i^{\text{hG**}} = c \kappa_i^{\text{hG*}} \quad \text{mit } c = \frac{\varphi_{\text{rel}}^{\text{h}}}{\overline{\kappa^{\text{hG}}} n \Delta s} \quad (2.10)$$

weiter verbessert werden. Während die horizontale Ausgangsrichtung φ_0^{h} für die Lastermittlung nicht von Interesse ist, ist die Ausgangssteigung φ_0^{v} maßgeblich für den Steigungsverlauf der gesamten Strecke. Ist die Gesamthöhendifferenz h_{rel} eines Messabschnitts bekannt, zum Beispiel durch Abfrage von Höhendaten der Landesvermessungsämter oder öffentlich zugänglicher Datenquellen [Goo14], kann aus

$$h_{\text{rel}} = \sum_{i=1}^n \Delta s \sin \left(\underbrace{\sum_{j=1}^i \Delta s \kappa_j^{\text{vG*}}}_{\varphi_i^{\text{v}}} + \varphi_0^{\text{v}} \right) \approx \sum_{i=1}^n \Delta s \sum_{j=1}^i \Delta s \kappa_j^{\text{vG*}} + n \Delta s \varphi_0^{\text{v}} \quad (2.11)$$

durch Umstellen φ_0^{v} gewonnen werden.

Neben mechanischen bestehen auch optische Gleismessverfahren. Sie lassen sich in kamerabasierte und laserlaufzeitbasierte Verfahren einteilen und sind Gegenstand bestehender kommerzieller Messsysteme und aktueller Untersuchungen [TB15].

2.4.2 Erzeugung aus GIS-Daten

Verkehrsbetriebe bzw. Netzbetreiber verfügen in der Regel über relativ genaue Daten hinsichtlich der Sollgleislage ihres Schienennetzes, meist verwaltet in einem spezialisierten GIS (*Geographic Information System*). Sind die oft im Wege stehenden bürokratischen und technischen Hürden für die Nutzung dieser Daten überwindbar, stellen sie eine hervorragende Grundlage für die Beschreibung der Infrastruktur dar. Eine effiziente, projektunabhängige Nutzung erfordert jedoch eine automatisierte Überführung der Daten in eine möglichst allgemeingültige Beschreibung. Als kleinste Gemeinsamkeit

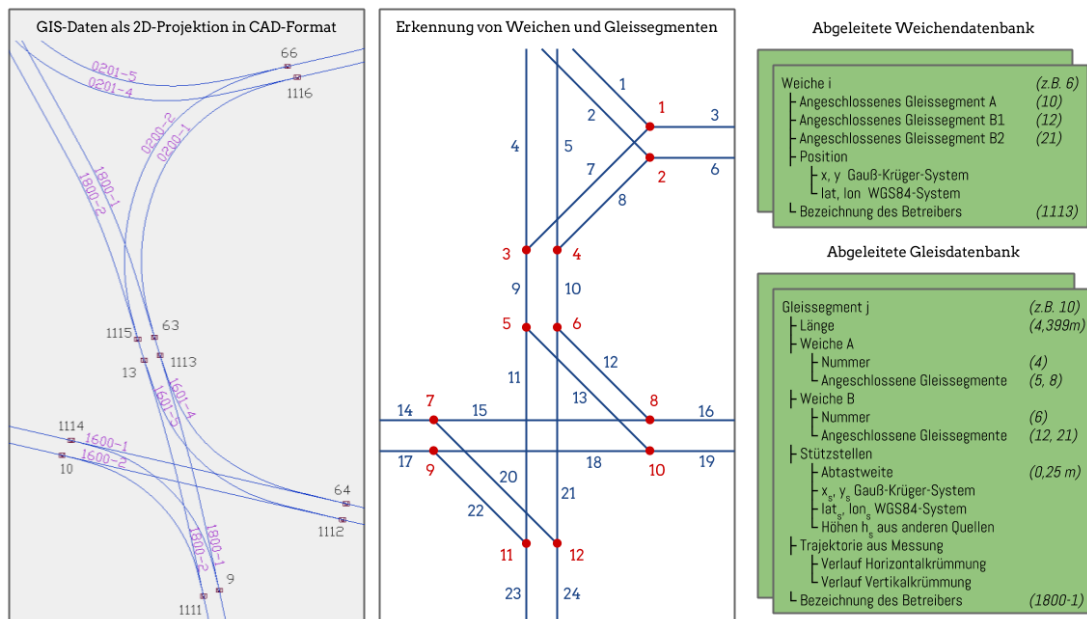


Bild 2.10: Systematisierung einer Gleisnetzzeichnung (Ausschnitt) und Ableitung einer Weichen- und Gleisdatenbank

der Daten unterschiedlichster Betreiber kann folgendes für den Datenbestand oder das Übergabeformat gelten:

- Zeichnung in einem CAD-Format mit 2D-Projektion des Gleisnetzes in einem kartesischen Koordinatensystem wie dem Gauß-Krüger-System;
- Darstellung aller Gleismittenachsen als Abfolge einzelner Vektorgrafikelemente (Polygonzüge, Kreisbögen, Splines) mit je zwei definierten und exakten Endpunkten. Dabei ausdrücklich keine Zusammenfassung benachbarter parallel laufender Gleise zu Doppelgleis;
- Markierung der Weichen am Schnittpunkt der Gleismittenachsen, d.h. auf Höhe der Weichenzunge.

Daher wird generell folgender Algorithmus vorgeschlagen, um automatisiert aus solchen minimalen GIS-Daten eine einheitlich nutzbare Datenbank für Simulation, Messung und Auslegung zu erhalten:

- Erkennung der Weichen anhand der Weichenmarkierungen. Aufbau einer Weichentabelle, jeder Eintrag bestehend aus einer beliebigen fortlaufenden Weichennummer und der Lage der Weiche. Optional kann die alphanumerische Weichenkennung des Betreibers extrahiert und mitgeführt werden. Diese befindet sich meist ausnahmslos in einem Textfeld, das der Weichenmarkierung am nächsten

ist. Diese Kennung ist vor allem für die einfache Kommunikation mit dem Betreiber hilfreich;

- (2) Suche von benachbarten Gleismittenachsen, d.h. Vektorgrafikelementen mit gemeinsamen Endpunkt. Rekursive Verbindung dieser Elemente, bis sie zusammen zwei Weichen aus der Weichenliste verbinden. Diese Abschnitte zwischen zwei Weichen werden im Folgenden stets als Gleissegmente bezeichnet. Sie werden beliebig fortlaufend nummeriert und bilden den Grundstock der Gleisdatenbank;
- (3) Nun können in der Weichentabelle jeder Weiche genau drei Gleissegmente zugewiesen werden. Die drei Gleismittenachsen treffen sich in der Weiche in einem spitzen und zwei stumpfen Winkeln. Die Weiche erlaubt den direkten Gleissegmentwechsel nur an den stumpfen Winkeln. Diese beiden Transitionen können in der Weichentabelle notiert werden.

In der Gleisdatenbank, bestehend aus einem Datensatz je Gleissegment, werden nun folgende Attribute abgelegt:

- die fortlaufende Gleissegmentnummer,
- die berechnete Länge des Segments,
- die Start- und Zielweiche des Gleissegments ohne Bevorzugung einer bestimmten Richtung (Stumpfgleissegmente erhalten keine Zielweiche. Bei Wendeschleifensegmenten, die von einer einzigen Weiche aufgespannt werden, wird diese Weiche doppelt, als Start- und Zielweiche, notiert.),
- die an der jeweiligen Weiche in stumpfem Winkel angeschlossenen ein oder zwei Gleissegmente,
- die zugrunde liegenden Vektorzeichnungselemente,
- einen Polygonzug der Gleismittenachse mit Stützstellen, die durch Neuabtastung der Vektorelemente im Abstand von z. B. 0,25 m errechnet sind,
- optional die Lage dieser Stützstellen in einem anderen Koordinatensystem, z. B. dem bei GPS genutzten WGS84 (als Breitengrad und Längengrad),
- optional der ungefähre Höhenverlauf durch Abfragen der Stützstellen in derselben oder anderen GIS-Datenbanken oder in öffentlich zugänglichen Datenquellen,
- optional eine Beschreibung der Gleismittenachse als s_i , κ_k^{hG} , κ_k^{vG} für die spätere Nutzung in der Simulation.

Bild 2.10 veranschaulicht den Prozess. Die Vorteile, die aus einer Gleisbeschreibung in dieser Form hervorgehen, werden in Abschnitt 2.5.2 verdeutlicht. Der Algorithmus wurde in [Len12] umgesetzt und am Beispiel des Gleisnetzes Dresden erfolgreich erprobt.

2.5 Zusammenführung von Fahrzeugmessung und Gleislagedaten

Da das Gleis als Hauptanregungsquelle für das Fahrzeug betrachtet werden kann, ist bei Fahrzeugmessungen mit bekannter Gleislage eine wesentlich aussagekräftigere Bewertung möglich. Da beide Messungen jedoch getrennt voneinander durchgeführt werden, ist es notwendig, beide Datenquellen zuverlässig einander zuordnen zu können. Dies erfordert, die Position des Fahrzeugs zu jedem einzelnen Zeitpunkt einem Ort entlang des Gleises zuzuweisen. Die Position des Fahrzeugs sei dabei als Ort der Mitte des ersten Radsatzes definiert. Im Folgenden werden unterschiedliche Herangehensweisen für kurze und lange Messabschnitte vorgestellt.

2.5.1 Synchronisierung von Gleis- und Fahrzeugmessung

Bei gezielten, begleiteten Fahrzeugmessungen auf örtlich begrenzten Streckenabschnitten ist die Zuordnung von Fahrzeugmessdaten zum Gleisabschnitt bekannt. Liegt die Gleislage dieses Abschnitts vor, müssen beide Datenquellen lediglich synchronisiert werden. Wenn bei der Fahrzeugmessung neben der Fahrgeschwindigkeit auch die Drehrate eines Fahrwerks, also die Winkelgeschwindigkeit um seine Hochachse aufgezeichnet wird, ist die im Folgenden beschriebene Verfahrensweise möglich.

Als Primär-Eingangsgrößen liegen fahrzeugseitig

- allgemeine Fahrzeugsensordaten einer oder mehrerer Messfahrten zu diskreten, äquidistanten Zeitschritten t_k^F mit $k \in \{1, \dots, m\}$, insbesondere
- die Geschwindigkeit des Fahrzeugs v_k^F sowie
- die Winkelgeschwindigkeit ω_k^F eines Fahrwerks um seine Hochachse

vor, gleisseitig sind

- allgemeine Gleislagedaten über eine definierte Gleiskilometrierung, das heißt zu diskreten, äquidistanten Wegschritten s_i^G mit $i \in \{1, \dots, n\}$, insbesondere
- die horizontale Gleiskrümmung κ_i^{hG}

gegeben. Als Ausgangsgrößen sind

- Zuordnung der Zeit der Fahrzeugmessung t_k^F und der Gleiskilometrierung s_i^G ,
- allgemeine Fahrzeugsensordaten über der Gleiskilometrierung s_i^G und
- allgemeine Gleislagedaten über der Zeit der Fahrzeugmessung t_k^F

gesucht.

Durch die Auswertung der Winkelgeschwindigkeit ω_k^F und der Fahrgeschwindigkeit v_k^F lässt sich zunächst die horizontale Gleiskrümmung am Fahrwerk κ_k^{hF} , zu jedem gemessenen Zeitschritt t_k nach

$$\kappa_k^{\text{hF}} \approx \frac{\omega_k^F}{v_k^F} \quad (2.12)$$

näherungsweise berechnen. Bei Fahrzeugstillstand $v_k^F = 0$ kann die Gleiskrümmung nicht, bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten $v_k^F < v_{\text{lim}}$ nur sehr ungenau berechnet werden (mit $v_{\text{lim}} \approx 0,2 \text{ m/s}$). Da der Krümmungswert bei stehendem Fahrzeug konstant, bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten nahezu konstant ist, kann dann jedoch der zum vorgehenden Zeitschritt ermittelte Wert in guter Näherung angenommen werden:

$$\kappa_k^{\text{hF}} \approx \begin{cases} \frac{\omega_k^F}{v_k^F}, & \text{wenn } v_k^F \geq v_{\text{lim}}, \\ \kappa_{k-1}^{\text{hF}}, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.13)$$

Weiter muss nun die vom Fahrzeug zurückgelegte Wegstrecke s_k^F über die Integration der Fahrgeschwindigkeit gewonnen werden. Die Integration eines zeitdiskreten Signals ist unter anderem mit Hilfe der NEWTON-COTES-Formeln [SK11] möglich. Ihre einfachste Form, die Sehnentrapezformel

$$s_k = \sum_{l=1}^k \frac{1}{2f} (v_l + v_{l-1}) + s_0, \quad (2.14)$$

wobei f die Abtastfrequenz des Signals darstellt, ist ausreichend, um die in der Realität begrenzte – aber nicht unbedingt stetige – Zugkraft zu berücksichtigen, die proportional zur Längsbeschleunigung ist. Die Sehnentrapezformel bringt hier eine sinnvolle Verbesserung gegenüber der Rechteckformel, die aufgrund der vergleichsweise geringen Abtastraten (z.B. 1 Hz) und hohen Beschleunigungen (z.B. 1 m/s^2) zu Wegfehlern in der Größenordnung von 10 m führt, wenn sich das Fahrzeug bei v_{max} (z.B. 20 m/s) befindet.

s_k^F beschreibt die zurückgelegte Wegstrecke in Abhängigkeit äquidistanter Zeitschritte. Für die Zusammenführung mit den wegabhängigen Gleismessdaten muss nun jedoch die Umkehrfunktion von s_k^F gebildet, das heißt die Messzeit t in Bezug zum zurückgelegten Weg gesetzt werden. Dies ist nur möglich, wenn s_k^F bijektiv, also auch streng monoton ist, was bei Wechsel der Fahrtrichtung oder bei Fahrgeschwindigkeit $v_k^F = 0$ nicht gilt. Um Monotonie sicherzustellen erscheint es zweckmäßig, nur Messabschnitte mit gleicher Fahrtrichtung auszuwerten und daher Messabschnitte mit Fahrtrichtungswechsel, wie in Abschnitt 2.1.2 dargestellt, zu erkennen und entsprechend zu unterteilen.

Um weiter auch strenge Monotonie und damit eine eindeutige Weg-Zeit-Zuordnung zu erreichen, können bei Fahrzeugstillstand sehr kleine positive Wegschritte angenommen werden. Die Bildung der Umkehrfunktion erfolgt dann durch Interpolation der Wertepaare s_k^F, t_k (mit äquidistanten t_k) in die Wertepaare t_i^*, s_i^{F*} (mit äquidistanten s_i^{F*}), zum Beispiel linear nach

$$t_i^* = t_l + \frac{t_{l+1} - t_l}{s_{l+1} - s_l} (s_i^{F*} - s_l) \quad \text{mit } s_l \leq s_i^{F*} < s_{l+1} \text{ für alle } i \in \{1, \dots, n\}. \quad (2.15)$$

Mit Hilfe von t_i^* können durch Verkettung und Interpolation auch alle anderen Fahrzeugmesswerte in Abhängigkeit der zurückgelegten Strecke ausgedrückt werden, insbesondere die fahrzeugseitig gemessene horizontale Gleiskrümmung

$$\kappa_i^{\text{hF}*} = \kappa_k^{\text{hF}} \circ t_i^*. \quad (2.16)$$

Die Kreuzkorrelationsfunktion $(\kappa^{\text{hG}} \star \kappa^{\text{hF}*})_l$ der beiden wegabhängigen Horizontalkrümmungsverläufe, besitzt ihr Maximum bei

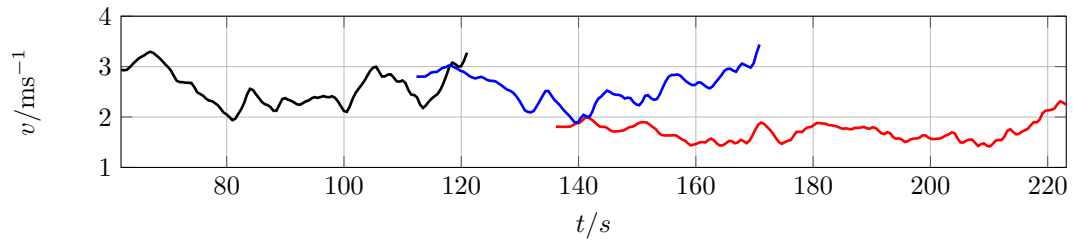
$$\Delta s_{\text{FG}} = \arg \max_l (\kappa^{\text{hG}} \star \kappa^{\text{hF}*})_l \cdot \Delta s. \quad (2.17)$$

Um diesen Wert muss s_k^F verschoben werden, durch

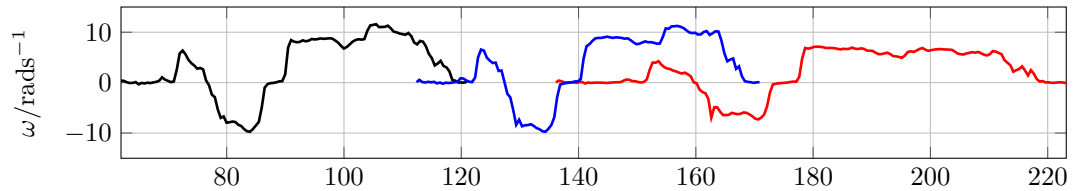
$$s_k^G = s_k^F + \Delta s_{\text{FG}}, \quad (2.18)$$

um beide Messungen in Deckung zu bringen.

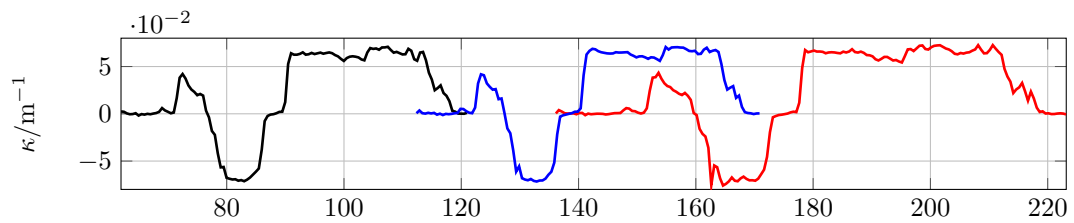
Als Beispiel zeigt Bild 2.11 drei Fahrten unterschiedlicher Fahrgeschwindigkeit auf demselben Gleisabschnitt. Plot (a) zeigt den zeitlichen Verlauf ihrer Fahrgeschwindigkeiten. Sie sind mit derselben Abtastfrequenz, aber unterschiedlichem, zufälligem Startzeitpunkt aufgezeichnet. Plot (b) zeigt die jeweils gleichzeitig aufgezeichnete Winkelgeschwindigkeit des führenden Fahrwerks um seine Hochachse. Aus Fahrgeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit ist die in Plot (c) gezeigte, nach Formel 2.13 berechnete wegbezogene horizontale Gleiskrümmung über der Zeit aufgetragen. Plot (d) wiederum zeigt den nach Formel 2.14 berechneten zurückgelegten Weg über der Zeit. Plot (e) zeigt schließlich das Ergebnis, wenn die ermittelte Gleiskrümmung über dem ermittelten Weg ausgedrückt und mit Hilfe der Kreuzkorrelation durch eine jeweils konstante Wegverschiebung in Deckung mit der unabhängig bei der Gleismessung ermittelten horizontalen Gleiskrümmung gebracht wurde.



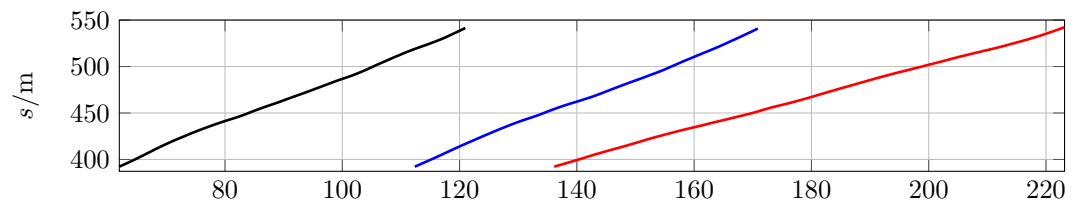
(a) Aufgezeichnete Fahrgeschwindigkeit bei drei Messfahrten auf demselben Gleisabschnitt



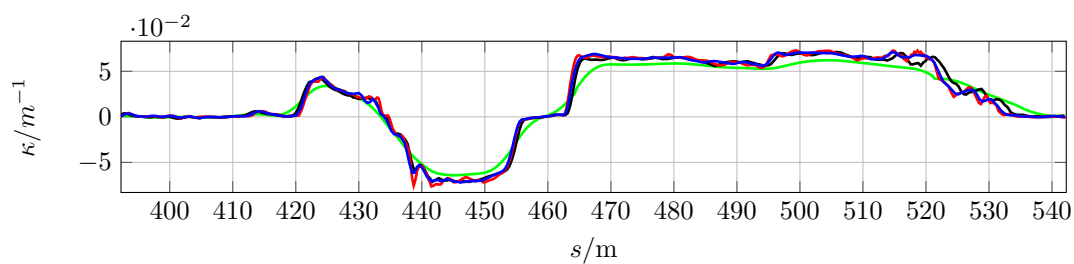
(b) Dabei aufgezeichnete Winkelgeschwindigkeit des führenden Fahrwerks um die Hochachse



(c) Aus (a) und (b) ermittelte horizontale Gleiskrümmung



(d) Aus (a) ermittelter zurückgelegter Weg



(e) Aus (c) und (d) ermittelte Gleiskrümmung über dem Weg, nach Kreuzkorrelation mit einer unabhängigen Gleismessung (grün)

Bild 2.11: Beispiel der Zuordnung dreier Messläufe unterschiedlicher Fahrgeschwindigkeit zur Gleiskilometrierung

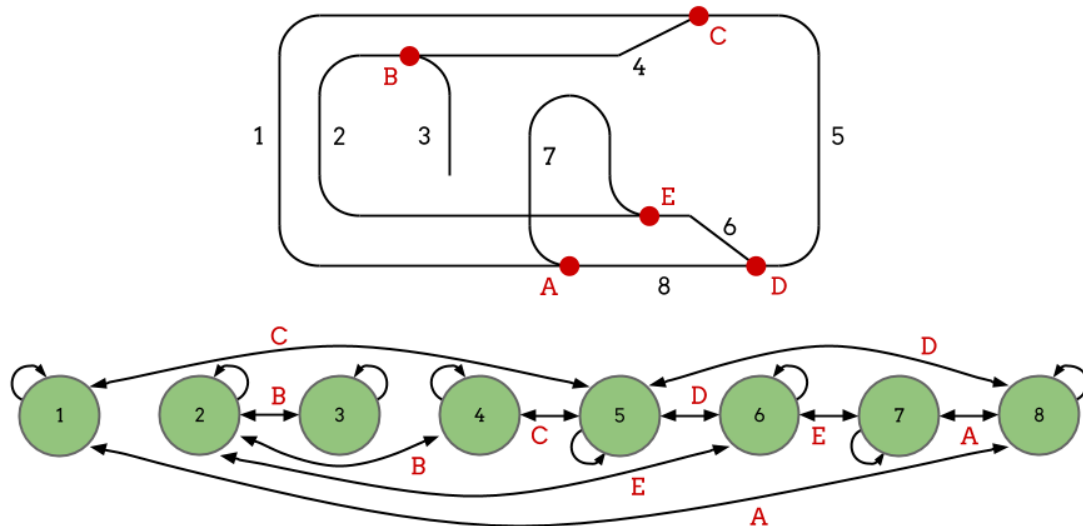


Bild 2.12: Einfaches Gleisnetz (oben), bestehend aus 8 Gleissegmenten und 5 Weichen, dargestellt als endlicher Automat (unten)

2.5.2 Zuordnung von Langzeitmessungen zum Gleisnetz

Im Gegensatz zu gezielten Messfahrten ist bei Langzeitmessungen der tatsächliche Fahrzeugeinsatz nicht ohne weiteres bekannt. Das Fahrzeug kann sich prinzipiell frei im gesamten Gleisnetz bewegen. Sollen hier mehrere Fahrzeugmessungen einander und den Gleisdaten zugeordnet werden, ist es als ersten Schritt notwendig, die befahrenen Gleisabschnitte zu ermitteln. Erst dann ist eine mit dem vorhergehenden Abschnitt vergleichbare Lösung denkbar.

Die Ermittlung der Gleisfolge ist auch bei der Messung des Fahrzeugortes über GPS keine einfache Aufgabe. Hilfreich ist hier eine nach dem oben beschriebenen Schema entwickelte Gleisdatenbank für das betrachtete Netz. Jedoch ist auch dann festzustellen, dass naheliegende Vorgehensweisen – wie die Zuordnung jedes GPS-Ortes zum Gleissegment mit der geringsten Entfernung – bei mehrspurigem Gleis und in Kreuzungsbereichen oft zu eher zufälliger Gleiszuordnung mit physisch nicht möglichen Sprüngen in der Gleisfolge führen. Im Vordergrund stehen daher zunächst die Fragen, welche Gleisfolgen theoretisch wie praktisch möglich sind und in welcher Weise sich die Anforderung an die Gleiszuordnung, nur mögliche Gleisfolgen in Erwägung zu ziehen, in einem Algorithmus berücksichtigen lässt.

Straßen- und Stadtbahnen verfügen über ein räumlich begrenztes Gleisnetz mit einer endlichen Anzahl an Weichen und Gleissegmenten. Ein vereinfachtes Gleisnetz mit typischen Merkmalen wie eingleisigen Abschnitten, zweigleisigen Abschnitten, Wendeschleifen und Stumpfgleisen zeigt Bild 2.12.

Da die beiden Eigenschaften

- (a) „Das Fahrzeug befindet sich (mit seinem führenden Radsatz) stets auf genau einem Gleissegment“ und
- (b) „Zwischen zwei aufeinander folgenden Zeitpunkten bleibt das Fahrzeug stets auf einem Gleissegment oder wechselt in ein angrenzendes Gleissegment“

gelten, soll in dieser Arbeit die Fahrzeugposition im Gleisnetz als **endlicher Automat** aufgefasst werden, wobei jedes Gleissegment genau einem Zustand und jede Weiche genau zwei bidirektionalen Transitionen entspricht. Hinzu kommt eine interne Transition je Gleissegment, die das Verharren des Fahrzeugs in einem Gleissegment beschreibt.

Der resultierende Graph, ebenfalls Bild 2.12, macht nun beispielsweise ersichtlich, dass eine physisch mögliche Zustandsfolge des Fahrzeugs, um von Gleissegment 2 zu Gleissegment 1 zu gelangen, die Gleissegmente $2 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 1$ enthält. Diese Folge beinhaltet einen Fahrzeugrichtungswechsel, der im Graphen des endlichen Automaten nicht ohne weiteres ersichtlich ist. Dieser darf zunächst nicht eingeschränkt werden, da er physisch möglich, betrieblich gewollt und in Messdaten vorhanden sein kann. Werden keine Einschränkungen getroffen, führt auch eine unendliche Anzahl weiterer Zustandsfolgen von Gleissegment 2 zu Gleissegment 1, darunter auch unwahrscheinliche Folgen wie $2 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 1$.

Um diese Anzahl zu reduzieren, kann die betrachtete Messfahrt, wie in Abschnitt 2.1.3 dargelegt, in zeitliche Abschnitte gleicher Fahrzeugrichtung unterteilt werden. Innerhalb dieser zeitlichen Abschnitte gilt nun zusätzlich:

- (c) „Das Fahrzeug verlässt ein Gleissegment stets über die Weiche, über die es nicht in das Gleissegment eingefahren ist.“

Eine besonders einfache Lösung, damit der endliche Automat diese Tatsache selbst abbildet, wird erreicht, indem jeder Zustand n in zwei Zustände na und nb mit der Bedeutung

- na : „Fahrzeug in Gleissegment n , Fahrtrichtung auf dem Gleis ist a “ und
- nb : „Fahrzeug in Gleissegment n , Fahrtrichtung auf dem Gleis ist b “

aufgeteilt wird. Es sei hier noch einmal auf die in Abschnitt 2.1.3 beschriebene Unterscheidung zwischen Fahrtrichtung und Fahrzeugrichtung hingewiesen und darauf, dass die Gleise mehrgleisiger Abschnitte nicht gesondert, sondern als unabhängige Gleise behandelt werden – ein zweigleisiger Abschnitt nun also vier Zuständen entspricht.

Der endliche Automat erweitert sich durch die Aufteilung, wie Bild 2.13 zeigt. Er lässt sich aus Bild 2.12 durch Verdoppelung der Anzahl an Zuständen und geeigneter Auflösung der bidirektionalen Transitionen zu einfachen Transitionen entwickeln. Aus

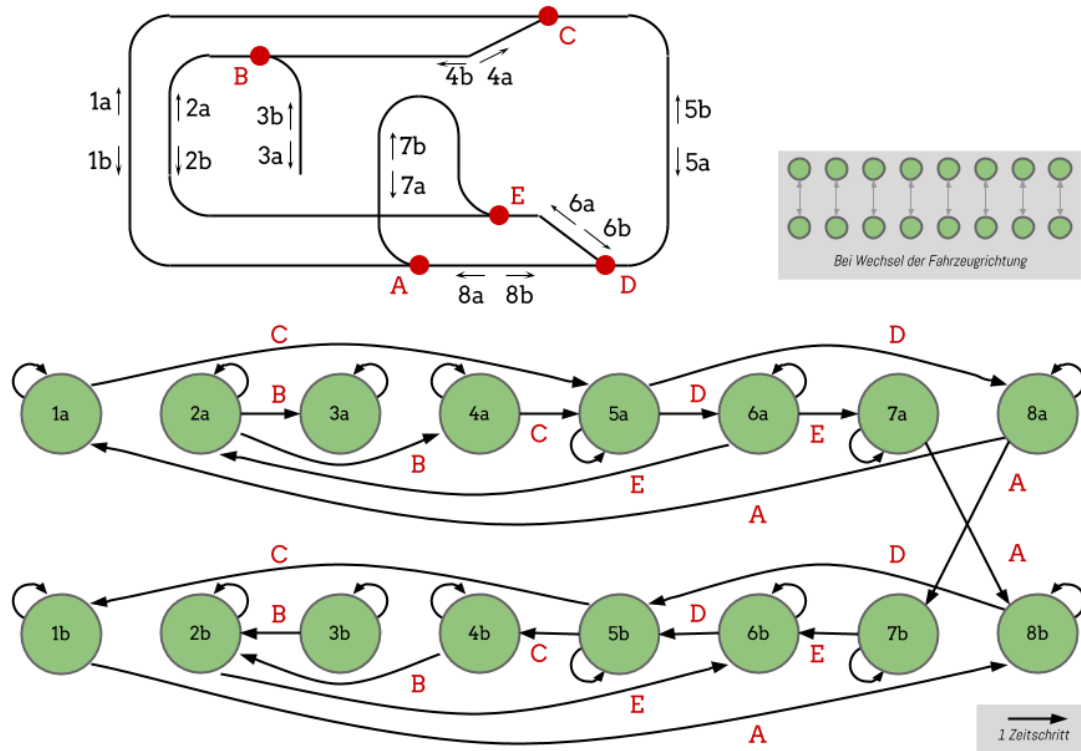


Bild 2.13: Erweiterung des endlichen Automaten auf zwei Fahrtrichtungen je Gleissegment, gültig für Zeitschritte ohne Fahrzeugsrichtungswechsel

dem Graphen des endlichen Automaten ist nun erkenntlich, dass ohne Wechsel der Fahrzeugsrichtung für das genannte Beispiel nur die vier Zustandsfolgen $2a \rightarrow 4a \rightarrow 5a \rightarrow 6a \rightarrow 7a \rightarrow 8b \rightarrow 5b \rightarrow 1b$, $2a \rightarrow 4a \rightarrow 5a \rightarrow 8a \rightarrow 7b \rightarrow 6b \rightarrow 5b \rightarrow 1b$, $2a \rightarrow 4a \rightarrow 5a \rightarrow 8a \rightarrow 1a$ und $2b \rightarrow 6b \rightarrow 5b \rightarrow 1b$ in Frage kommen, ohne dass jedwede Einschränkungen hinsichtlich der betrieblichen Abläufe getroffen werden müssen. Die Anzahl möglicher Zustandsfolgen ist folglich stark reduziert, zudem lassen sich diese deutlicher voneinander unterscheiden.

Man kann hieraus schließen, dass bei bekanntem Start- und Endgleissegment einer Fahrzeugmessung mit vergleichsweise wenigen oder nur groben weiteren Ortswerten aus dem GPS-Signal eine sehr wahrscheinliche Fahrtroute zugewiesen werden kann. Problematisch ist allerdings, dass bei Langzeitmessungen keine zuverlässige Bestimmung dieser beiden Segmente möglich ist, sondern im Gegenteil gerade die Start- und Endorte, hervorgerufen durch die bei GPS systembedingt langen Initialisierungszeiten und nicht zuletzt durch überdachte Betriebshallen, praktisch nie präzise festzustellen sind.

Aus dieser Überlegung heraus soll nun ein **Algorithmus für die Gleiszuordnung** erarbeitet werden, der ohne diese Anfangsbedingungen die bestmöglichen Ergebnisse liefert. Die Zustände können problemlos durchgängig indiziert werden, eine besondere

Behandlung der a- und b-Zustände ist nicht erforderlich. Sie bilden den Zustandsraum

$$\mathcal{S} = \{1, \dots, n\}. \quad (2.19)$$

Grundgedanke des Algorithmus ist es, die bekannte Information, dass sich das Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt in jedem einzelnen Zustand befinden könnte, während der gesamten Berechnung nicht einzuschränken, sondern vielmehr jedem Zustand zu jedem Zeitschritt eine Wahrscheinlichkeit zuzuordnen. Für die Beschreibung der Wahrscheinlichkeit eines Zustands wird vereinfacht ein Strafwert genutzt, der stets positiv sei und mit zunehmender Wahrscheinlichkeit kleiner werde. Erst abschließend soll durch eine globale Optimierung jene Gleissegmentfolge ermittelt werden, die in der Gesamtbeurteilung am wahrscheinlichsten befahren wurde. Der entwickelte Algorithmus soll im Folgenden beschrieben werden.

Zunächst sind das Gleisnetz einzulesen, der endliche Automat aufzustellen, die Zustände zu indizieren und eine (dünnbesetzte) Matrix der erlaubten Transitionen

$$\mathbf{T} \in \{0, 1\}^{n \times n} \quad (2.20)$$

zwischen den Zuständen zu ermitteln.

Als weitere Grundlage ist eine Matrix \mathbf{P} der Strafwerte $p_{k,i}$ für $k \in \{1, \dots, m\}$ Zeitschritte und $i \in \mathcal{S}$ Zustände aufzustellen. Als Strafwert wird jeweils der Abstand des zu t_k gemessenen GPS-Ortes zum betrachteten Zustand i genutzt. Ein GPS-Ort sei durch die kartesischen Koordinaten $x_k^{\text{GPS}}, y_k^{\text{GPS}}$ beschrieben, der Ort des Zustands $i \in \mathcal{S}$ mit $l \in \{1, \dots, o_i\}$ Stützstellen durch die Koordinaten x_l^i und y_l^i . Somit ergibt sich aus

$$p_{k,i} := \min_{l \in \{1, \dots, o_i\}} \sqrt{(x_k^{\text{GPS}} - x_l^i)^2 + (y_k^{\text{GPS}} - y_l^i)^2} \quad \text{für alle } \begin{matrix} k \in \{1, \dots, m\} \\ i \in \{1, \dots, n\} \end{matrix} \quad (2.21)$$

die Matrix der Strafwerte

$$\mathbf{P} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & & i & & n \end{matrix} \\ \begin{matrix} t_1 \\ \\ t_{k-1} \\ t_k \\ \\ t_m \end{matrix} & \begin{pmatrix} p_{1,1} & \dots & p_{1,i} & \dots & p_{1,n} \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ p_{k-1,1} & & p_{k-1,i} & & p_{k-1,n} \\ p_{k,1} & & p_{k,i} & & p_{k,n} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ p_{m,1} & \dots & p_{m,i} & \dots & p_{m,n} \end{pmatrix} \end{matrix} \in \mathbb{R}^{m \times n}. \quad (2.22)$$

Nun soll in diese Strafwertmatrix die Information eingearbeitet werden, dass jeder Zustand i zu den Zeitpunkten t_k mit $k > 1$ nur erreicht werden kann, wenn bestimmte Vorzustände eingetreten sind, die wiederum mit einer Wahrscheinlichkeit behaftet sind. Hierfür muss für jeden dieser Zeitschritte ein kumulierter Strafwert gebildet werden. Ohne die Ermöglichung von Transitionen würde dies nach

$$p_{k,i} = p_{k,i} + p_{k-1,i} \quad \text{für alle } k \in \{2, \dots, m\} \quad (2.23)$$

erfolgen, da das Fahrzeug bis zum Ende im jeweils angenommen Zustand verharren müsste.

Berücksichtigt man nun die möglichen Transitionen, so tritt der Fall auf, dass ein von i verschiedener Vorzustand von i zum Zeitpunkt t_{k-1} einen geringeren Strafwert als i selbst aufweist. Welche Zustände für den vorhergehenden Zeitpunkt in Frage kommen, beschreibt die Transitionsmatrix. Aus ihr kann für jedes i die entsprechende Untermenge aus allen Zuständen, $\mathcal{J}_i \subset \mathcal{S}$, ermittelt werden. Diese Mengen \mathcal{J}_i sind konstant und schließen den Zustand i jeweils selbst mit ein.

Für die stets für jeden Zustand i getroffene Annahme, dass sich das Fahrzeug zum Zeitpunkt t_k in ihm befindet, ist es unabhängig von allen nachfolgenden Zeitpunkten am wahrscheinlichsten, dass das Fahrzeug diesen Zustand durch einen Wechsel aus dem möglichen Vorzustand mit dem kleinsten Strafwert erreicht hat. Daher kann der kumulierte Strafwert zeilenweise für alle $k \in \{2, \dots, m\}$ nach

$$p_{k,i} = p_{k,i} + \min_{j \in \mathcal{J}} p_{k-1,j} \quad \text{für alle } i \in \mathcal{S}, \quad (2.24)$$

statt nach Formel 2.23, gebildet werden. Bild 2.14 veranschaulicht diese Summenbildung. In einer Zustandswechselmatrix $\mathbf{W} \in \mathbb{Z}^{m \times n}$ kann der genutzte Vorzustand

$$\mathbf{W}_{k,i} = \arg \min_{j \in \mathcal{J}} p_{k-1,j} \quad (2.25)$$

abgelegt werden. Der Zustand i mit dem zum Endzeitpunkt t_m kleinsten kumulierten Strafwert $p_{m,i}$ stellt den Endzustand der wahrscheinlichsten Zustandsfolge, der Fahrtroute R dar, daher gilt

$$R_m = \arg \min_{i \in \mathcal{S}} \mathbf{W}_{m,i}. \quad (2.26)$$

Die Zustandswechselmatrix $\mathbf{W}_{k,i}$ kann nun ausgehend von ihm rückwärts von m bis 2 durchlaufen werden, um die gesamte wahrscheinlichste Fahrtroute

$$R_{k-1} = \mathbf{W}_{k,R_k} \quad \text{für } k \in \{m, \dots, 2\} \quad (2.27)$$

auszulesen.

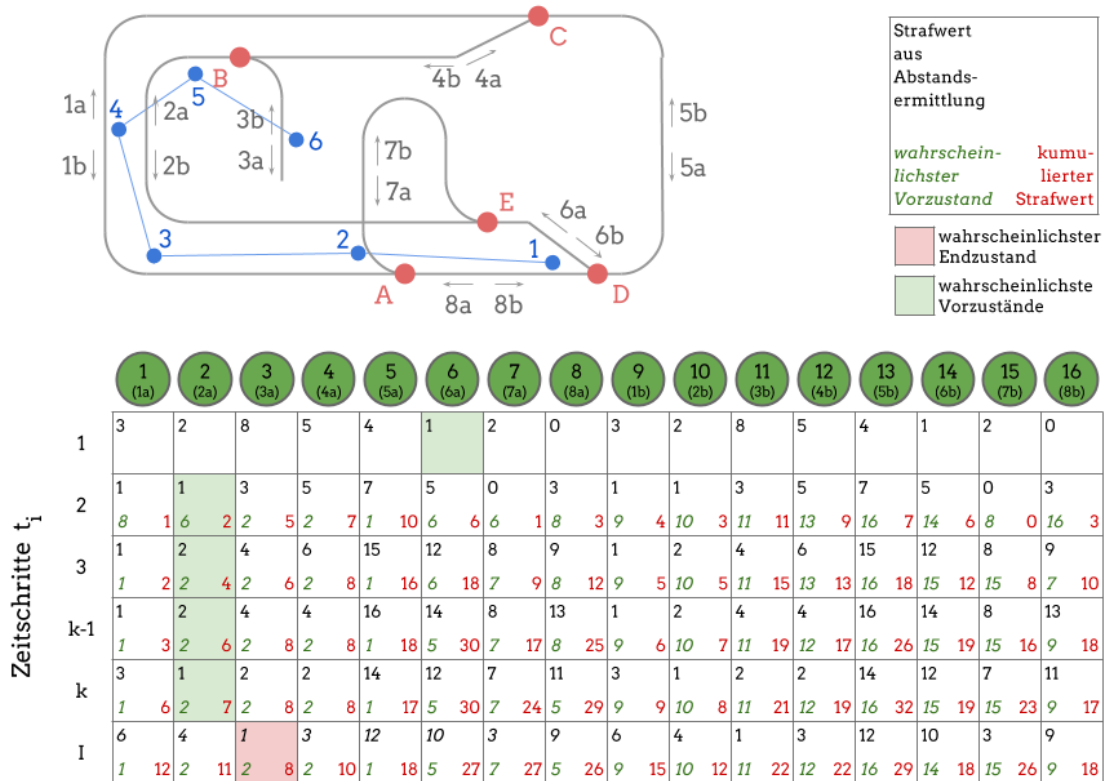


Bild 2.14: Matrix der Strafwerte eines Beispielortszeitverlaufs (blau), Matrixdimension in der Realität etwa 50 000 x 2 000

Es ist davon auszugehen, dass der Algorithmus auf beliebige Schienenfahrzeuge in endlichen, bekannten Gleisnetzen ohne Änderung anwendbar ist, da er keine Parameter wie Startwerte, Grenzwerte, Schwellenwerte und Abbruchbedingungen besitzt und daher auch keine Parameter angepasst werden müssen.

Die **Erprobung der Verfahrensweise** erfolgte mit Fahrzeugmessdaten der Dresdner Messstraßenbahn im Umfang von rund 145000 km. Das Dresdner Gleisnetz umfasst etwa 300 km Gleis, bestehend aus etwa 990 Gleissegmenten, die mit etwa 650 Weichen verbunden sind. Daraus ergeben sich für den endlichen Automaten 1980 Zustände und 4580 Transitionen.

Der Algorithmus wurde in dieser Form in MATLAB umgesetzt. Ergänzend zur obigen Beschreibung wurde der initiale Strafwert eines Zeitpunkt-Zustand-Paares bei 200 m gedeckelt. Dadurch bewirken große Fehler und vollständige Aussetzer des GPS-Signals einen identischen Strafwert für alle Zustände, müssen nicht gesondert behandelt werden und stellen über kürzere Zeiträume kein Problem für die Gleiszuweisung dar. Zudem wurde implementiert, dass der zurückgelegte Weg Einfluss auf die untersuchten Transitionen ausübt, was den theoretischen Sonderfall abfängt, dass das gestörte GPS-Signal

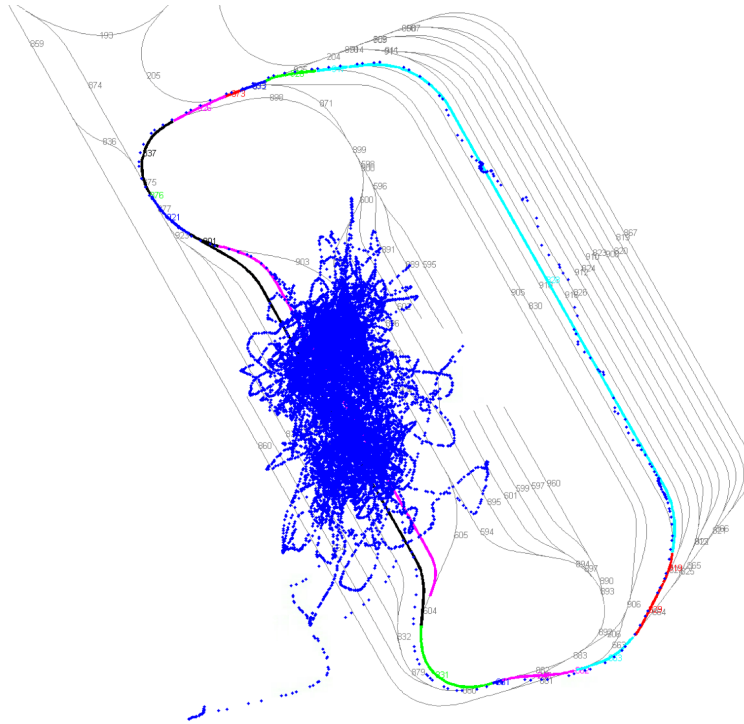


Bild 2.15: Robuste Gleiszuweisung einer kurzen Fahrt trotz schlechter Anfangs- und Endwerte des GPS-Signals (blau)

zufallsbedingt großräumige, mögliche Alternativrouten beschreibt, was in der praktischen Untersuchung jedoch nicht aufgetreten ist.

Der Algorithmus kann als Folge dessen, dass der Suchraum für das Auffinden der wahrscheinlichsten Gleisfolge zu keiner Zeit begrenzt wird, zum Teil als *Brute-Force*-Algorithmus eingeordnet werden. Dies macht ihn auf Kosten der Rechenzeit extrem robust. Zeitaufwändig ist vor allem das initiale Aufstellen der Strafwerttabelle, in die für eine Messdauer von 16 h im vorliegenden Fall rund $7 \cdot 10^{10}$ Abstandswerte einfließen. Durch die Deckelung des Strafwerts und mit Hilfe optimierter Algorithmen zur Berechnung von Abständen [Zec08] und insbesondere minimalen Abständen [Zec09], lässt sich die Berechnung der Strafwerttabelle stark beschleunigen, sodass auch ohne weitere Optimierung – wie *Lookup*-Tabellen, Parallelisierung oder Kompilierung der genutzten Interpretersprache – etwa $4 \cdot 10^9$ Abstandswerte pro Sekunde Rechenzeit berücksichtigt werden können.

Der beschriebene Algorithmus zeigt in der praktischen Untersuchung die gewollte Unempfindlichkeit gegen undefinierte Anfangs- und Endwerte – eine Beispielauswertung hierfür zeigt Bild 2.15. Obwohl keine Informationen für eine bevorzugte Fahrtrichtung auf bestimmten Gleisen hinterlegt wurden – zum Beispiel in Wendeschleifen oder auf zweigleisiger Strecke – ordnet der Algorithmus überaus zuverlässig das jeweils korrekte

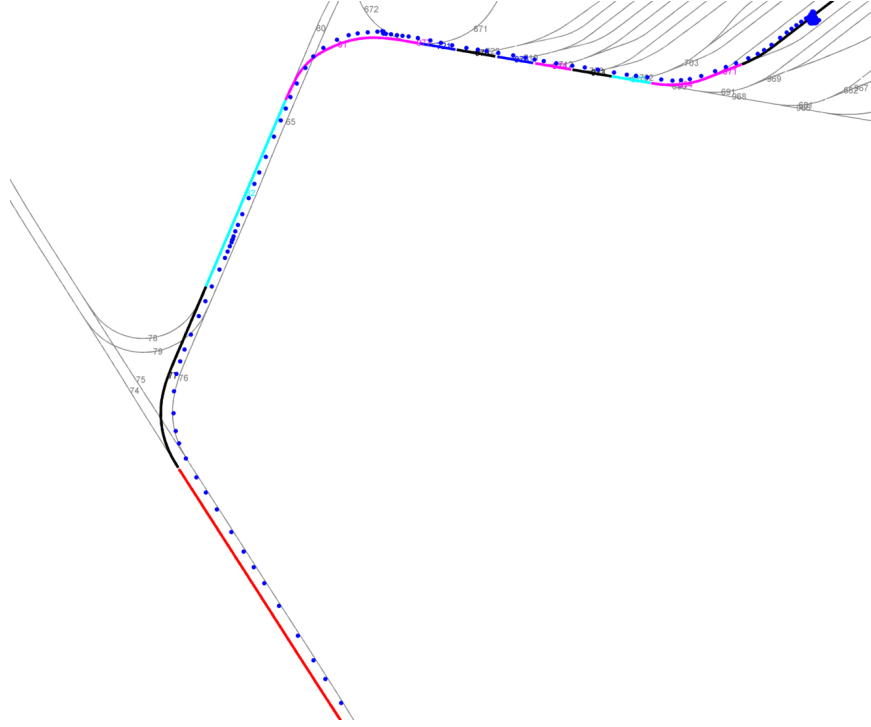


Bild 2.16: Robuste, gleisselektive Gleiszuweisung trotz irreführenden Drifts des GPS-Signals (blau)

Richtungsgleis zu, da er die einzelnen Ortswerte stets im Kontext der gesamten Fahrt betrachtet. Ein solches Szenario zeigt Bild 2.16.

Mit der gefundenen Zustandsfolge lassen sich nun die der gesamten Fahrt zugrunde liegenden Streckendaten, zum Beispiel auch die Gleiskrümmung κ_i^{hG} , zusammenstellen. Damit ist für die Messfahrt nun prinzipiell die in 2.5.1 beschriebene Synchronisierungsmethode anwendbar, die vollständig ohne GPS-Daten auskommt. Diese Methode ist jedoch stark auf die Kenntnis des vom Fahrzeug zurückgelegten Wegs angewiesen. Bereits ein kleiner relativer Fehler in der Geschwindigkeitsmessung führt über große Entfernungen zu einer erheblichen Wegabweichung, zum Beispiel ergibt ein relativer Fehler von 0,1 % über 300 km eine Wegabweichung von 300 m. In der Folge ist die Wegverschiebung zwischen Gleis- und Fahrzeugmessung nicht konstant, wie in Abschnitt 2.5.1, sondern eine Funktion über dem Weg selbst.

Gesucht wird daher ein Verschiebungswert Δs_k für jedes s_k^{F} . Ohne Betrachtung eines Wegmessfehlers liegt der konstante Verschiebungswert im Intervall

$$\Delta s_{\text{stat}} \in [0 \dots \min(l_{R_1}, l_{R_m})], \quad (2.28)$$

bestimmt durch die Länge des kürzeren der beiden nur zum Teil befahrenen Gleisseg-

mente am Anfang und Ende der Gleissegmentsequenz. Hinzu kommt ein wegabhängiger Fehler, der aus dem Fehler der bereits nach Formel 2.2 korrigierten Geschwindigkeitsmessung herrührt. Durch ihn vergrößert sich das Suchintervall konservativ auf

$$\Delta s_k \in s_{\text{stat}} + [-0,005 \dots 0,005] \cdot s_k. \quad (2.29)$$

Es sind viele Herangehensweisen denkbar, um den Verschiebungsverlauf zu ermitteln. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dafür ein Algorithmus nach dem *Divide-and-Conquer*-Prinzip [OW02] entworfen, der die Problemstellung rekursiv [CLRS09] löst. Sein Aufruf erfolgt mit einem mit numerisch unbestimmten Werten (*NaN*-Werten) initialisierten Verschiebungsvektor Δs .

Er teilt den fahrzeugseitig ermittelten wegabhängigen Krümmungsverlauf κ_i^{hF} (gemeinsam mit dem Weg s_i^{F}) in zwei Teile, für $i_\alpha \in \left\{1, \dots, \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right\}$ sowie für $i_\beta \in \left\{\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor + 1, \dots, n\right\}$. Für diese fahrzeugseitigen Teilverläufe wird nun ein Verschiebungswert zum gleisseitigen Verlauf κ_j^{hG} ermittelt. Durch das wiederholte Befahren von Linien weisen die im Betriebsalltag erfassten Strecken typischerweise eine starke Periodizität auf. Aus diesem Grund darf der Verschiebungswert nur im oben berechneten Verschiebungsbereich gesucht werden. Wie in Abschnitt 2.5.1 wäre die Ermittlung mit Hilfe der Kreuzkorrelation möglich, diese neigt aber zu unzuverlässigen Ergebnissen, wenn wie hier das Auffüllen (*Zero-Padding*) einer großen Signallängendifferenz notwendig ist. Daher wird für die Ermittlung ein vergleichbares Verfahren genutzt, das statt auf der Maximierung des Korrelationskoeffizienten auf die Minimierung der Summe der Fehlerquadrate setzt, wenn beide Verläufe zueinander verschoben werden:

$$\Delta_\alpha = \arg \min_{\rho} \sum_{j=1}^o \left(\kappa_{i_\alpha + \rho}^{\text{hG}} - \kappa_j^{\text{hF}} \right)^2; \quad (2.30)$$

$$\Delta_\beta = \arg \min_{\rho} \sum_{j=1}^o \left(\kappa_{i_\beta + \rho}^{\text{hG}} - \kappa_j^{\text{hF}} \right)^2. \quad (2.31)$$

Es wird nun überprüft ob der Teilabschnitt mehr als doppelt so groß ist wie eine definierte Mindestlänge (zum Beispiel 50 m):

- Trifft dies zu, führt sich der Algorithmus nach der Logik der Rekursion nacheinander für jeden der beiden Teilabschnitte selbst aus und übergibt dabei den aktuellen Verschiebungsvektor Δ und einen angepassten Verschiebungsbereich, der den bisher gefundenen jeweiligen Verschiebungswert Δ_α oder Δ_β berücksichtigt. Er erhält einen ergänzten Verschiebungsvektor zurück. Ohne weiteren Formulierungsaufwand werden die Gesamtverläufe auf diese Weise immer feiner unterteilt und die Auflösung des Verschiebungsvektors immer weiter erhöht.

- Trifft dies nicht zu, ist die Abbruchbedingung für den rekursiven Aufruf erfüllt. Der Algorithmus trägt die beiden gefundenen Verschiebungen an den zugehörigen Stützstellen in den Verschiebungsvektor ein,

$$\Delta_{\lfloor \frac{n}{4} \rfloor} := \Delta_\alpha \quad , \quad \Delta_{\lfloor \frac{3n}{4} \rfloor} := \Delta_\beta \quad (2.32)$$

und gibt diesen zurück;

Durch die Rekursion sind keine weiteren Schritte erforderlich. Im Ergebnis liefert der Algorithmus einen an vielzähligen Stellen besetzten Verschiebungsverlauf. Die verbleibenden *NaN*-Einträge können linear interpoliert werden. Den auf diese Weise ermittelten Verschiebungsverlauf einer tatsächlichen Fahrtmessung über 350 km zeigt Bild 2.17. Mit Hilfe des Verschiebungsverlaufs kann nun der Wegverlauf s_k^F des Fahrzeugs sehr genau korrigiert werden. Die Fahrzeugmessung wird dadurch im Wegbereich entzerrt. Dies wird in Bild 2.18 gezeigt.

Wie weiter oben festgestellt, wurde aufgrund ihrer Vorteile die Sehnentrapezformel (Formel 2.14) genutzt, um den Wegverlauf aus der Fahrgeschwindigkeit zu ermitteln. Numerische Integrationsverfahren abweichend von der Rechteckformel besitzen jedoch auch den wesentlichen Nachteil, dass sie nicht ohne weiteres umkehrbar sind. Soll nun aus dem korrigierten Wegverlauf eine ebenfalls korrigierte Fahrgeschwindigkeit gewonnen werden, kann so der kombinierte Fehler des Integrations- und Differentiationsverfahrens den Nutzen der Korrektur übertreffen. Dieser Fragestellung wird in einschlägiger

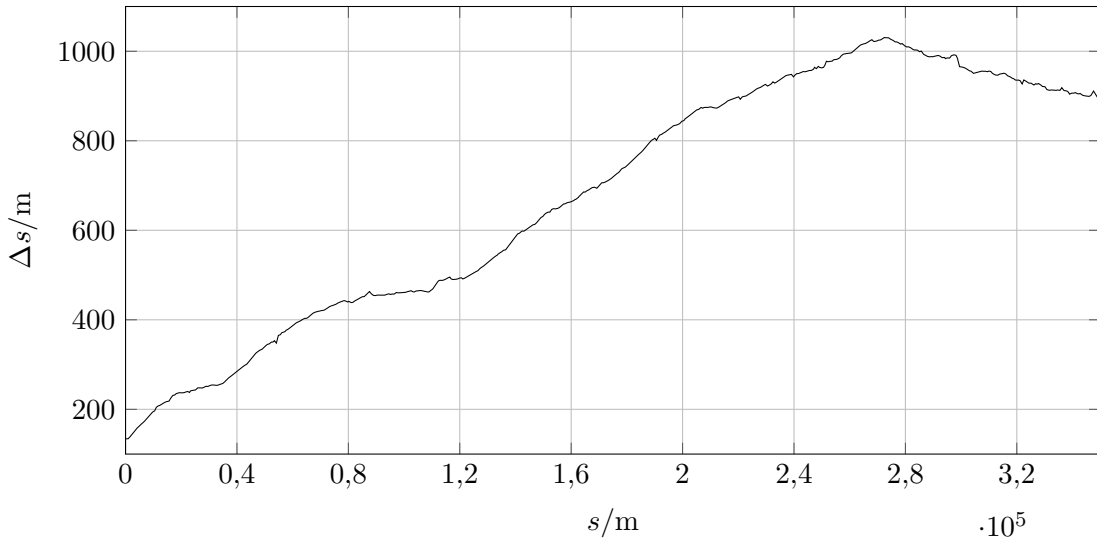


Bild 2.17: Verschiebungsverlauf zur Wegkorrektur über eine Strecke von 350 km

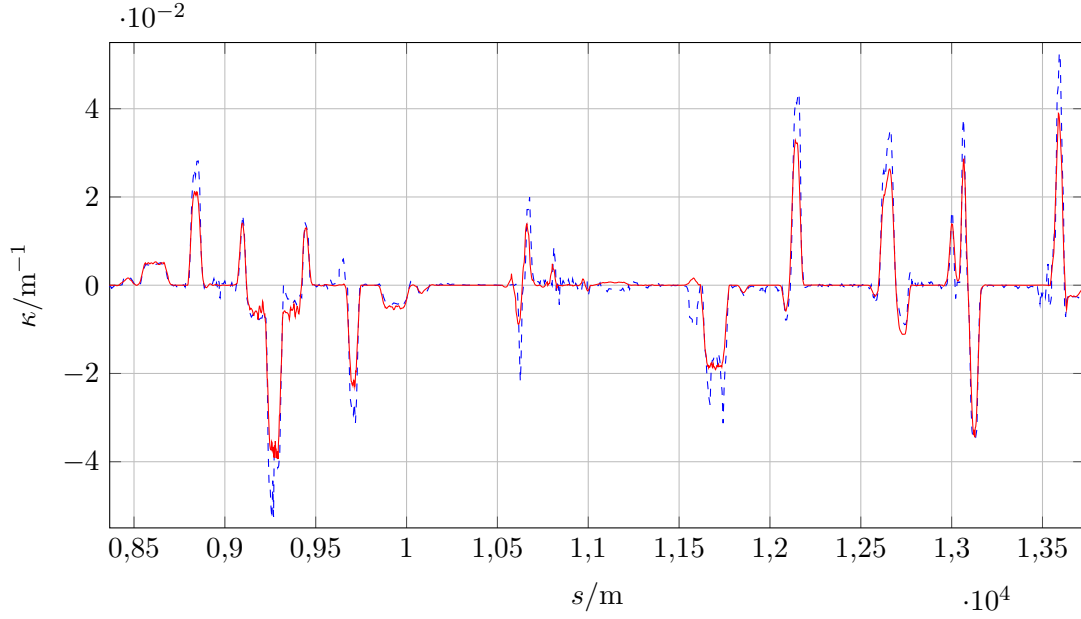


Bild 2.18: Vollständig entzernte und in Deckung gebrachte fahrzeugseitig (blau) und gleisseitig (rot) ermittelte Gleiskrümmungsverläufe über der Strecke (Ausschnitt)

Literatur nicht nachgegangen. Da aus Formel 2.14 durch Umstellen

$$s_k = \underbrace{\sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{2f}(v_i + v_{i-1})}_{s_{k-1}} + s_0 + \frac{1}{2f}(v_k + v_{k-1}) \quad (2.33)$$

folgt, lassen sich bei bekanntem v_0 (zum Beispiel $v_0 = 0$) alle übrigen v_k durch

$$v_k = 2f(s_k - s_{k-1}) - v_{k-1} \quad (2.34)$$

schrittweise aus dem Wegverlauf zurückentwickeln. Der numerischen Instabilität dieser Vorgehensweise muss bei langen Zeitverläufen jedoch geeignet entgegengewirkt werden, um weiterhin sicherzustellen, dass dem Fahrzeug keine Geschwindigkeiten unter Null zugeordnet werden. Durch die Rückentwicklung der Fahrgeschwindigkeit kann diese auf einen relativen Fehler im Bereich von 0,001 % korrigiert werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass auch unbegleitete Langzeitmessungen mit großer Genauigkeit dem Gleisnetz und damit beispielsweise auch einer Gleismessung zugeordnet werden können. Dies ermöglicht eine gemeinsame Nutzung von Fahrzeug- und Gleismessdaten in der Lastfallsimulation, sowie eine Zuordnung von Trassierung und Gleisstörung zu den gemessenen Lasten und Beanspruchungen.

3 Modellbildung von Straßen- und Stadtbahnen

„Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“[Vdi93; Bei06] Dieses Kapitel widmet sich der Modellbildung von Straßen- und Stadtbahnen für die numerische Simulation, mit dem Ziel, Erkenntnisse über die in der Wirklichkeit auf die Wagenkastenstrukturen wirkenden Lasten zu gewinnen.

3.1 Grundlagen

Schienenfahrzeuge sind mechanische Systeme, bestehend aus einzelnen Körpern definierter Masse und Trägheit, die durch Gelenke, Feder- und Dämpferelemente miteinander verbunden sind und die unter Einfluss äußerer Kräfte stehen. Damit bilden sie **Mehrkörpersysteme**. Ihre Systemeigenschaften sind nichtlinear – zum einen da sich relevante Feder- und Dämpferelemente nichtlinear verhalten, zum anderen da sich zwischen den einzelnen Körpern große Drehwinkel ausprägen. Letzteres gilt im besonderen Maße für Straßen- und Stadtbahnen, wo Winkeländerungen von bis zu 60° auftreten. Aufgrund der Nichtlinearität kann ihr dynamisches Verhalten nur in einer Zeitschritt-simulation berechnet werden.

Körper reiner Mehrkörpersysteme sind starr und gestaltlos. Sie besitzen jeweils ein körperfestes Koordinatensystem, in dem alle relevanten, zueinander ortsfeste Punkte des Körpers beschrieben werden. Ein Körper besitzt genau ein explizites Gelenk, das ihn mit 0 bis 6 Freiheitsgraden an einen Punkt eines körperfremden Koordinatensystems anbindet. Die Beschreibung seiner Lage kann durch generalisierte Koordinaten erfolgen – Verschiebungen und Drehungen, die in Art und Anzahl mit den Freiheitsgraden übereinstimmen.

Mehrere Körper bilden ein **kinematisches System**, das zwangsläufig als Baumstruktur beschrieben ist. Um ergänzend hierzu einen Schleifenschluss zu realisieren, können kinematische Zwangsbedingungen zwischen beliebigen Punkten des Gesamtsystems eingeführt werden. Diese werden auch als implizite Gelenke bezeichnet.

Die **Kinetik** beschreibt schließlich die Bewegung des Körpers aufgrund äußerer Kräfte unter Berücksichtigung der Kinematik und der Eigenschaften Schwerpunktlage, Masse und Trägheitstensor. An definierten Punkten eines Körpers können äußere Kräfte und Momente auf ihn wirken. Diesen Kraftelementen können beliebige Kraftgesetze zugrunde liegen, die in Abhängigkeit der Zustandsgrößen Lage und Geschwindigkeit und in Abhängigkeit der Zeit formuliert sind.

Um nun die Berechnung der Kinematik und Kinetik eines Systems mehrerer Körper im Zeitbereich zu ermöglichen, ist es zunächst notwendig, die physikalische Beschreibung des Systems in eine mathematische zu überführen. Im einfachsten Fall lässt sich ein Mehrkörpersystem als Differentialgleichungssystem 2. Ordnung in der Form

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) \quad (3.1)$$

beschreiben, wobei \mathbf{q} der Vektor der generalisierten Koordinaten und $\dot{\mathbf{q}}$ dessen zeitliche Ableitung sei. Gemeinsam stellen \mathbf{q} und $\dot{\mathbf{q}}$ den Systemzustand dar. Sowohl die Massennmatrix \mathbf{M} als auch der Vektor der gyroskopischen Terme \mathbf{h} sind vom Systemzustand abhängig. Die äußeren Kräfte \mathbf{f} können wie oben beschrieben zusätzlich von der Zeit abhängig sein. Werden kinematische Zwangsbedingungen genutzt, erweitert sich Formel 3.1 im Allgemeinen zu einem differential-algebraischen Gleichungssystem. Näheres wird unter anderem in [LB12a] beschrieben.

Zum automatischen Aufstellen des Gleichungssystems für jeden neuen Systemzustand werden *Formalismen* benötigt. Im betrachteten Anwendungsfall tritt zu jedem Zeitschritt ein neuer Systemzustand ein. Die Funktionsweisen unterschiedlicher Formalismen bilden ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen verschiedenen Simulationsumgebungen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit der MKS-Software Simpack gearbeitet. Eine hilfreiche Beschreibung der beiden in Simpack genutzten Formalismen findet sich in [Dro04].

Durch das Lösen des Gleichungssystems eines Zeitschritts mit Hilfe eines *Solvers* wird der Systemzustand des Folgezeitschritts ermittelt. Dabei herrscht stets ein Zielkonflikt zwischen großer Schrittweite und großer Genauigkeit. Solver sind oft stark auf ein Anwendungsfeld optimiert und das Ergebnis jahrzehntelanger Entwicklung. Stand der Technik in der MKS-Software Simpack ist der Solver **SODASRT2**. Die benötigte Rechenzeit ist für die Lastsimulation von untergeordneter Bedeutung. Da stets eine Vielzahl unterschiedlicher Lastfälle betrachtet werden muss, ist die Berechnung problemlos parallelisierbar.

Das Mehrkörpersystem für die Lastsimulation umfasst Teilmodelle für beides – Fahrzeug und Fahrweg. Im Folgenden sollen zunächst gebräuchliche Methoden zur Modellierung des Fahrwegs, dann der Fahrwerke, der Fahrwerksanlenkung und der Wagen-

kastenverbindungen beschrieben werden, um schließlich im Detail auf Methoden zur Modellierung der Wagenkastenstrukturen und auf die Bildung des Gesamtmodells einzugehen.

3.2 Modellierung des Fahrwegs

Der Fahrweg bildet die Grundlage des Modells. Das Simulationsprogramm muss gewisse Grundfunktionalitäten für dessen Modellierung bieten. Spezifika zur Umsetzung in Simpack finden sich in [Sim08] und werden im Folgekapitel eingehend behandelt. An dieser Stelle soll jedoch beschrieben werden, in welcher Form der Fahrweg definiert werden kann.

3.2.1 Beschreibung des Gleises

Es gilt zunächst, den Verlauf des Gleises im Raum – die Gleistrajektorie – zu beschreiben. Eine naheliegende Form hierfür ist die **Beschreibung über kartesische Koordinaten**. Ausgehend vom Ursprung des Inertialsystems werden mit Hilfe der Koordinaten x_i , y_i und z_i mit $i = \{1, \dots, n\}$ einzelne Stützstellen der Gleismittenachse im Raum festgelegt. Diese Beschreibungsform ist für die Simulation in der Regel ungeeignet, da die Gleistrajektorie nicht als Polygonzug über die Stützstellen aufgefasst werden darf. Es ist in diesem Fall nötig, mit Hilfe von *Splines* eine zweifach differenzierbare Raumkurve abzuleiten.

Es ist daher vorteilhaft, direkt eine **Beschreibung als Raumkurve** zu suchen. Dabei wird der Ort des Gleises entlang der Gleismittenachse diskretisiert, wodurch eine Wegkoordinate s_i^G mit $i = \{1, \dots, n\}$ entsteht. Eine gebräuchliche Abtastweite ist $\Delta s = s_i - s_{i-1} = 0,25$ m. An diesen Orten beschreiben Horizontalkrümmung κ_i^{hG} und Vertikalkrümmung κ_i^{vG} die Richtungsänderung der Gleismittenachse, während die Überhöhung durch den Winkel τ_i oder die gegenseitige Höhenlage u_i ausgedrückt wird, wobei

$$\tau_i = \arcsin \frac{u_i}{b} \quad (3.2)$$

mit dem Abstand der Radaufstandsweite $b = \text{const.}$ gilt. Die Berechnung von τ_i ist stets notwendig, da auch die Schienen selbst um diesen Winkel geneigt werden müssen.

3.2.2 Beschreibung der Schienen

Aus der Beschreibung der Gleismittenachse mit Hilfe der Raumkurve ergibt sich gemeinsam mit der konstanten Spurweite die Nennlage beider Schienen. Diese ideale Nennlage

wird in der Realität von einer **Gleislagestörung** überlagert. Sie kann allgemein entweder durch die Größen

- Querabweichung und
- Vertikalabweichung des Gleises zur Gleismittenachse,
- Abweichung der Spurweite zur Nennspurweite und
- Überhöhungsfehler,

oder eingängiger durch die

- Querabweichung der linken Schiene,
- Vertikalabweichung der linken Schiene,
- Querabweichung der rechten Schiene und
- Vertikalabweichung der rechten Schiene

zur Solllage beschrieben werden. Beide Beschreibungen lassen sich ineinander überführen. Alle Größen sind veränderlich über dem Weg s_i^G .

Die Gleislagestörung kann direkt in dieser Form vorgegeben werden – zum Beispiel wenn sie aus einer Messung hervorgeht. Alternativ kann sie zufällig aus der Gleislagequalität generiert werden. Eine mögliche Beschreibungsform für die Gleislagequalität ist die spektrale Leistungsdichte der Gleislagestörung. Eine ausführliche Behandlung findet in [Qua04] statt.

Schienen besitzen bedingt durch ihre Form – einem gegen Null strebenden Verhältnis von Querschnitt zu Länge – selbst nur eine geringe Torsions- und Biegesteifigkeit. Diese erhalten sie durch die Lagerung am Oberbau in kurzen Abständen, üblicherweise etwa 0,6 m. Die **Elastizität der Schiene** ist daher stark von der Lagerung und der Bauform des Oberbaus abhängig. Typische Steifigkeiten für diese elastische Lagerung sind im Modell zu berücksichtigen. Weiterführend sei auf [Ger13] verwiesen. In der Realität tritt bei vereinzelt fehlerhafter Lagerung – zum Beispiel durch Unterspülung des Gleises – unter der Last des Fahrzeugs eine punktuelle Verschiebung der Schiene zur Nennlage auf. Diese Arbeit folgt der These, dass solche *Pumpstellen* zwar eine hohe Verwindung und damit Lastverschiebung im Fahrwerk zur Folge haben können, für die Belastung des Wagenkastens jedoch nachrangig sind, da sie nicht über eine für den Wagenkasten relevante Verwindungsbasis auftreten.

3.2.3 Einbindung gemessener Gleislage

Nach der Erfassung der Gleislage kann nicht ohne weiteres unterschieden werden, welche gemessenen Anteile der Nennlage und welche der Störung zuzurechnen sind. Für die Einbindung gemessener Gleislage in das Gesamtmodell ist es jedoch notwendig, die

ermittelte Gleistrajektorie in eine angenommene Sollgleislage und eine diese Gleislage überlagernde Gleislagestörung aufzuteilen. Dies kann nach [Har12] über ein Tiefpassfilter zur näherungsweisen Ermittlung der Sollgleislage erfolgen. Die Differenz zwischen dieser Sollgleislage und dem gemessenen Gesamtsignal bildet dann die Gleislagestörung.

Bei der Messdatenverarbeitung und Einbindung der gemessenen Gleislage existiert eine Vielzahl an möglichen Fehlerquellen, insbesondere hinsichtlich Raumrichtungen und Einheitenkonvertierung. Diese müssen durch eine Validierung des Gesamtprozesses ausgeschlossen werden. An dieser Stelle sei vorgeschlagen, das jeweilige Messsystem mit seiner Sensorik stets selbst als Mehrkörpersystem nachzubilden und mit diesem die gleichen Primärgrößen wie in der Realität zu erfassen. Durch eine Iteration von simulierter Messung, Auswertung und erneuter Einbindung der Gleislage lassen sich Fehler dann unmittelbar erkennen.

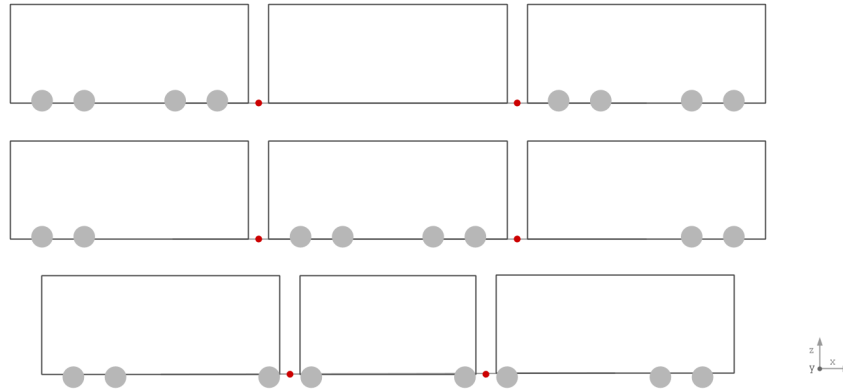
3.3 Modellierung des Fahrwerks

Im Bereich der Straßen- und Stadtbahnen existiert eine Vielzahl an Fahrzeugkonzepten. Unterschieden werden kann insbesondere zwischen Fahrzeugen mit zum Gleis statisch bestimmter Stellung sowie Fahrzeugen mit zum Gleis einfach unterbestimmter Stellung. Erstere, konventionellere Bauform bedingt bei n Wagenkästen stets genau $n+1$ Fahrwerke, die einen hohen Ausdrehwinkel ermöglichen müssen und daher meist als klassische Drehgestelle ausgeführt sind. Beispiele hierfür zeigt Bild 3.1a. Letztere benötigen bei einer ungeraden Anzahl von n Wagenkästen nur mindestens $\frac{n+1}{2}$ Fahrwerke, die wiederum keine oder nur kleine Ausdrehwinkel zulassen dürfen. Gängige Umsetzungen zeigt Bild 3.1b. Während Fahrwerke mit großen Ausdrehwinkeln in der Regel durchgängige Radsatzwellen aufweisen, werden Fahrwerke mit kleinen Ausdrehwinkeln oft als Losradfahrwerke realisiert. Bild 3.2 zeigt hingegen als Beispiel ein Mehrkörpermodell eines Fahrwerks mit kleinen Ausdrehwinkeln und durchgängigen Radsatzwellen. Trotz dieser grundlegenden Unterschiede weisen alle Fahrwerkstypen in der Modellierung viele gemeinsame Anforderungen auf, die im Folgenden behandelt werden.

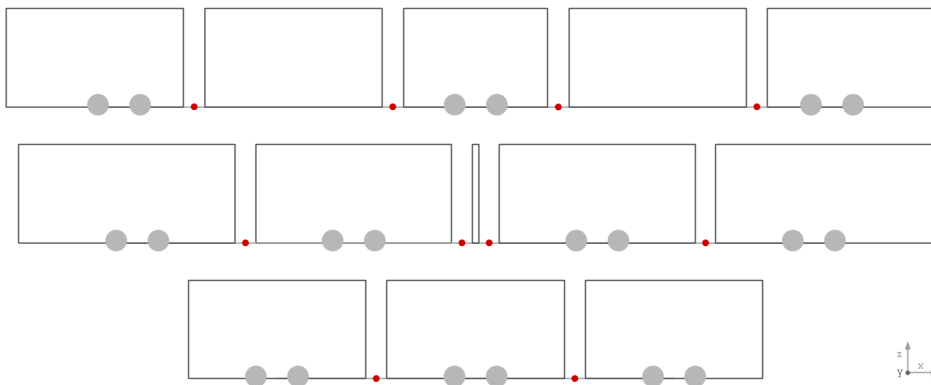
3.3.1 Rad-Schiene-Kontakt

Es soll zunächst auf die Modellierung des Rad-Schiene-Kontakts eingegangen werden, da dessen Abbildung als Kernelement der Simulation der Schienenfahrzeugdynamik betrachtet werden kann [Pol11].

Am Rad-Schiene-Kontakt wird das Fahrzeug vertikal getragen, lateral geführt und gegebenenfalls longitudinal angetrieben. Jede der beiden Schienen kann ideal als Körper mit konstantem Querschnitt (dem jeweiligen Schienenprofil) betrachtet werden, wobei



(a) Bestimmte Stellung zum Gleis, große Ausdrehwinkel zw. Fahrwerken und Wagenkästen (konventionelle Drehgestelle, Jakobsdrehgestelle)



(b) Einfach unterbestimmte Stellung zum Gleis, geringe Ausdrehwinkel zw. Fahrwerken und Wagenkästen

Bild 3.1: Beispiele gängiger Fahrzeugkonzepte für Straßen- und Stadtbahnen, ohne Betrachtung der variierenden oberen Gelenkverbindungen

der Querschnitt entlang der Schienenraumkurve extrudiert ist. Die Räder werden in dieser Arbeit als ideal rotationssymmetrische Körper mit dem Querschnitt des Radprofils aufgefasst. Jeder Radkörper besitzt zu jedem Zeitpunkt im Regelfall genau einen Berührungspunkt mit einer Schiene. Insbesondere im Straßenbahnbereich stellen sich aufgrund der geringen Radkonizität und kleiner Bogenradien auch häufig zwei oder mehr Berührungspunkte ein. Für die Ermittlung der Berührungspunkte genügt neben der Kenntnis der Profile prinzipiell die Kenntnis der lateralen Starrkörperbewegung von Rad zu Schiene. Die Lage der Kontaktpunkte in Abhängigkeit dieser Querverschiebung illustriert beispielhaft Bild 3.3 [Pol10].

Durch die Elastizität der Körper bilden sich in diesen Berührungspunkten Kontaktflächen aus, die einen Punkt maximalen Drucks besitzen, welcher zum Rand der Kontaktfläche hin abnimmt. Wichtige Arbeiten zur Gestalt dieser Kontaktflächen basieren auf HERTZ,

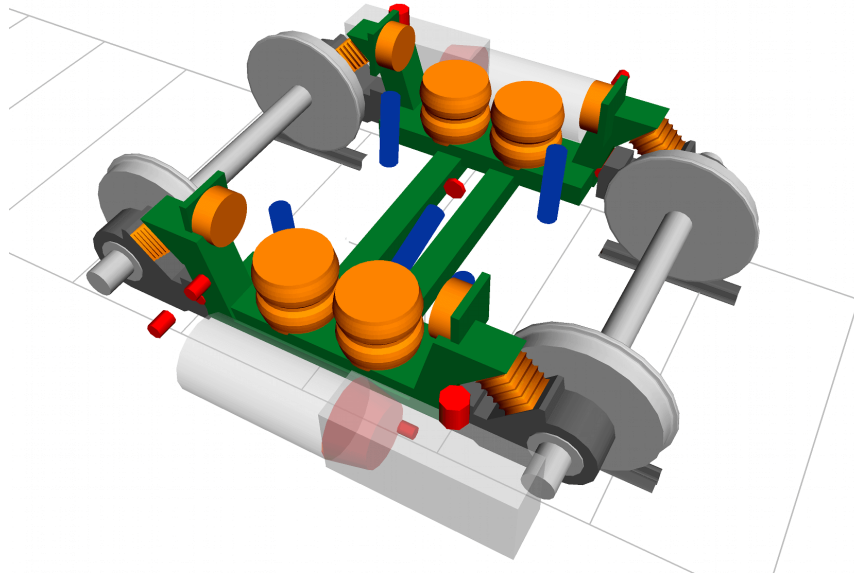


Bild 3.2: Mehrkörpermodell eines Fahrwerks einer Niederflurstraßenbahn

insbesondere [Her82]. Die Größe der Kontaktfläche ist maßgeblich von der wirkenden Normalkraft abhängig, die sich zu einem großen Teil aus der vertikalen Radaufstandskraft ergibt. Werden weiter auch Quer- und Längskräfte in der Kontaktfläche übertragen, ergibt sich zwischen beiden Körpern zwangsläufig ein Quer- beziehungsweise Längsschlupf. Dieser grundsätzliche Zusammenhang wird oft mit Hilfe des *Bürstenmodells* veranschaulicht. Während das Rad hierbei nicht gleitet, beide Oberflächen im Druckmaximum demnach noch haften, teilt sich die Kontaktfläche nun in eine Haftzone und eine Gleitzone.

Steht der Normalenvektor der Kontaktfläche in einem von Null verschiedenen Winkel zur Rotationsebene des Rades, was durch die Konizität der Räder im Allgemeinen anzunehmen ist, ergibt sich zusätzlich eine Drehbewegung beider Kontaktflächen zueinander, der ein Moment entgegenwirkt, durch das sich analog zum Quer- und Längsverhalten ein *Bohrschlupf* einstellt. Im Bereich der Straßen- und Stadtbahnen ist – aufgrund niedriger Konizität der Lauffläche einerseits und bogenbedingt häufigem Anlaufen an den Spurkranz andererseits – von einem Wechsel zwischen sehr geringem und hohem Bohrschlupf auszugehen.

Die Beschreibung der Kraftgesetze im rollenden Kontakt unter beliebiger Kraft und insbesondere die effiziente numerische Berechnung sind Probleme der Kontaktmechanik. Mit der linearen Theorie [Kal67], der empirischen Theorie und der exakten Theorie, zusammen [Kal90], sowie den beiden Algorithmen FASTSIM und CONTACT, stellen deren Lösungen das Lebenswerk von KALKER [SKK07] dar. Einen unverzichtbaren

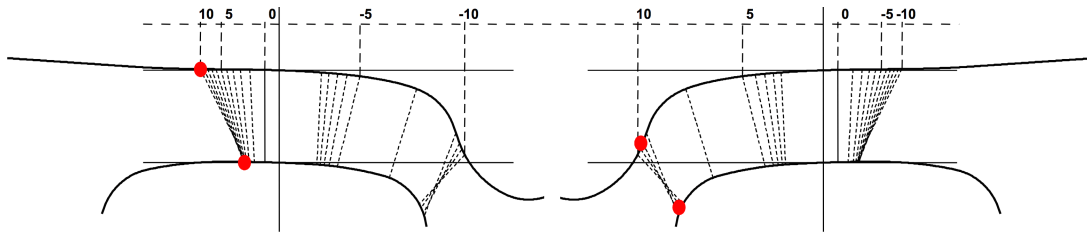


Bild 3.3: Veränderung der Berührgeometrie im Rad-Schiene-Kontakt in Abhängigkeit der Radsatzquerauslenkung nach [Pol10]

Überblick über diese Arbeiten verschafft [ZS09]. Zur Implementierung in die Mehrkörpersimulation siehe auch [Net98].

Der offensichtlich große Einfluss des Reibungskoeffizienten μ zwischen Rad und Schiene auf das Kontaktverhalten ist nicht unproblematisch, da dieser in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit und der Oberflächenbenetzung durch Wasser und Schmierstoffe sehr unterschiedliche Werte annehmen kann. In Simulationen zur Sicherheit gegen Entgleisen, zur Laufstabilität und zum Fahrkomfort wird daher oft ein hierfür ungünstig hoher Reibungskoeffizient angesetzt. Bei der Simulation von Lasten für die Festigkeitsauslegung ist zu berücksichtigen, dass dieses Vorgehen nicht pauschal übernommen werden kann. Da ein niedriger Reibungskoeffizient höhere Fahrgeschwindigkeiten vor Entgleisen ermöglicht, insbesondere bei der Einfahrt in Bögen ohne Übergangsbögen, kann hier die Verringerung des Reibungskoeffizienten zu einer deutlichen Lasterhöhung führen.

3.3.2 Antrieb und Antriebsregelung

Das Simulationsmodell muss in der Lage sein, die ihm vorgegebene Fahrgeschwindigkeit trotz einwirkender äußerer Kräfte zu halten oder – je nach Anforderung – zu verändern. Hierfür ist eine Abbildung des Antriebs und eine Form der Antriebsregelung erforderlich.

Die Modellierung des **Antriebs** kann dabei folgende, steigende Detaillierungsgrade besitzen:

- Holonom rheonome Zwangsbedingung an einem Körper (zum Beispiel dem führenden Wagenkasten);
- Vorgabe einer translatorischen Zugkraft an einem oder mehreren Körpern;
- Vorgabe von Antriebsmomenten (Traktion + Bremsen) zwischen Fahrwerksrahmen und den angetriebenen Radsatzwellen oder Losrädern;
- Vorgabe von Antriebsmomenten (Traktion + Bremsen) zwischen Ständer und Läufer der Fahrmotoren, Modellierung des Antriebsstrangs;

- Vorgabe von Traktionsmomenten zwischen Ständer und Läufer der Fahrmotoren, Aufteilung und Vorgabe von Bremsmomenten an Fahrmotoren und mechanischen Bremsen.

Zugleich umfasst die **Antriebsregelung**, ebenfalls mit steigender Komplexität, die folgende Stufen:

- Konstante Geschwindigkeitsvorgabe;
- Konstante Vorgabe der Zugkraft oder des Antriebsmoments;
- Vorgabe eines Geschwindigkeitszeitverlaufs, P-Regelung der Zugkraft oder des Antriebsmoments;
- Vorgabe eines Geschwindigkeits- und eines Wegzeitverlaufs, PI-Regelung der Zugkraft oder des Antriebsmoments.

Eine Vorgabe der Fahrgeschwindigkeit über dem Weg, als Funktion $v_{\text{soll}}(s)$, ist im Allgemeinen ungeeignet, da dann wegen der singulären Stellung bei $v_{\text{soll}}(s) = 0$ keine vollständigen Haltevorgänge simuliert werden können. In der Folge können diese weder als Lastfälle gezielt betrachtet werden, noch können gemessene Geschwindigkeitsprofile genutzt werden, wenn diese Geschwindigkeiten nahe Null enthalten. Daher muss die Fahrgeschwindigkeit über der Zeit, $v_{\text{soll}}(t)$, als Sollgröße gewählt werden.

Um dem Problem vorzubeugen, dass bei langen Simulationsstrecken die Synchronität zwischen Geschwindigkeitsprofil und Trassierung durch bleibende Regelabweichungen verloren geht, sollte zusätzlich auch der zurückgelegte Fahrweg über der Zeit $s_{\text{soll}}(t)$ als Reglereingang genutzt werden. Ein PI-Regler, der das Antriebsmoment in Abhängigkeit dieser beiden Regelabweichungen einstellt, ist in der Praxis bereits ausreichend genau. Stabilitätsprobleme können vor allem bei ungünstiger Wahl der Ist-Geschwindigkeit auftreten – hier ist die Nutzung der translatorischen Geschwindigkeit des Radsatzes der des Wagenkastens vorzuziehen, um die Verzögerungszeiten der Regelstrecke gering zu halten.

Es ist weiter zu berücksichtigen, dass bei Trassierungen mit engen Bögen wesentliche Wegdifferenzen und damit auch Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Fahrwerken bestehen. Die Wegdifferenz entlang der Gleismitte jedes Fahrwerks zum ersten Fahrwerk ist beispielhaft in Tabelle 3.1 dargestellt. Diese Geschwindigkeitsunterschiede können und dürfen nicht ausgeglichen werden.

3.3.3 Federstufen, Dämpfung und Anlenkung des Fahrwerks

Fahrwerke von Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen verfügen über mehrere Federstufen zwischen Radaufstandspunkt und Wagenkasten. Da aus Wartungs- und Kostengrün-

Tabelle 3.1: Fahrwerksabstand entlang der Gleismittelnachse auf der Geraden/im 16m-Bogen, am Beispiel einer siebenteiligen Multigelenkstraßenbahn

	$s_{r=\infty}$	$s_{r=16\text{ m}}$	Δs
Fahrwerk 1	0,000 m	0,000 m	0,000 m
Fahrwerk 2	11,230 m	11,186 m	0,044 m
Fahrwerk 3	22,460 m	22,364 m	0,096 m
Fahrwerk 4	33,690 m	33,538 m	0,152 m

den ohnehin Räder mit Radreifen eingesetzt werden, bietet sich deren Ausführung als **gefederte Räder** an, das heißt mit einer Elastomerschicht zwischen Radreifen und Radkörper. Diese Bauform dient der Verminderung von Schallabstrahlung, Körperschall und Vibrationen, während ihr Einfluss auf die Belastung des Wagenkastens durch die nachgelagerten, wesentlich weicheren Federstufen als sehr gering einzuschätzen ist. Eine detaillierte Betrachtung der Modellbildung gefederter Räder für den Bereich der Straßen- und Stadtbahnen findet sich in [KVC12].

Trotz gefederter Räder werden üblicherweise die gesamte Radmasse, gegebenenfalls die Radsatzmasse, sowie die Teilmassen der daran abgestützten Antriebs Elemente den *ungefederten Massen* zugerechnet. Zwischen diesen Massen und dem Drehgestell- oder Fahrwerksrahmen wirkt die **Primärfederung**. Auch diese ist oft als Elastomer ausgeführt und besitzt charakteristische nichtlineare Steifigkeitskennlinien in vertikaler und lateraler Richtung. Eine Bewegung in Fahrzeuginnenrichtung wird in der Regel durch Längslenker unterbunden.

Als letzte Federstufe wirkt zwischen Fahrwerksrahmen und Wagenkasten oder gegebenenfalls zwischen Drehgestellrahmen und Drehgestellwiege die **Sekundärfederung**. Diese ist in der Nennlage oft linear als Stahlfeder ausgeführt. Eine rein lineare Auslegung ist bei Straßen- und Stadtbahnen jedoch in der Regel nicht möglich, da das große Verhältnis von maximal beladenem zu unbeladenem Fahrzeug bei limitiertem Federweg ein insgesamt progressives Verhalten erfordert. Dies kann zum Beispiel mit nachgelagerten Federelementen erreicht werden. Für das Modell ergeben sich entsprechend Steifigkeitskennlinien mit charakteristischem Knick.

Eine besondere Herausforderung hinsichtlich der Modellierung stellt der Einsatz von Luftfedern dar. Neben dem bereits nichtlinearen Verhalten des befüllten, geschlossenen Luftfederbalgs muss das pneumatische System für die Luftmengenregelung im Balg im Modell abgebildet werden. In [Kra12] wird dies mit Hilfe der gekoppelten Simulation umgesetzt. Dabei wird die Luftmenge im Balg über eine Makroschrittweite als kon-

stant angenommen und die resultierende Federsteifigkeit im Mehrkörpersystem direkt abgebildet. Nach jedem Makroschritt wird die Luftmengenänderung über ein separates, pneumatisches Modell ermittelt, in dem Leitungswiderstände, Regel- und Ausgleichsventile sowie Zusatzvolumina Berücksichtigung finden.

Sowohl die Primär- als auch die Sekundärfederstufe verfügen über **Anschläge** in beide Quer- und Vertikalrichtungen, einschließlich einer Abhebesicherung. Diese können entweder in die Steifigkeitskennlinien der jeweiligen Kraftelemente integriert werden oder – insbesondere bei räumlicher Trennung – als gesonderte Kraftelemente modelliert werden.

Der abschließende Schritt bei der Modellbildung von Federstufen ist die Berechnung **nomineller Kräfte**. Straßen- und Stadtbahnen werden wie die meisten Fahrzeuge so ausgelegt, dass sie sich im unbeladenen, betriebsbereiten, der Erdbeschleunigung ausgesetzten Zustand in ihrer Nennlage befinden. Dies setzt eine nominelle Vorspannung der Federstufen voraus. In der Praxis wird dies durch Federn erreicht, die im entspannten Zustand eine größere Länge als in Einbaulage aufweisen und die durch ein Beilagenkonzept feinabgestimmt werden können. In der Simulation wird in der Regel hingegen eine nominelle Kraft – also ein konstanter Kraftversatz – für jedes Federelement bestimmt, um auf einfacherem Weg die gleiche Wirkung zu erzielen. Während bei linearen Federn wie Schraubenfedern diese Vorgabe ausreicht, ist bei nichtlinearen Federn wie Elastomerfedern zusätzlich eine Verschiebung des Nullpunkts ihrer Kraft-Weg-Kennlinien in Höhe der Nominalkraft notwendig. Es ist von großer Bedeutung für die Lastsimulation, dass die Bestimmung der nominellen Kräfte mit der Masse und Masseverteilung des unbeladenen Fahrzeugs erfolgt, um bei der Simulation des beladenen Fahrzeugs die korrekte Einfederung und Ausnutzung der Federwege zu erhalten – und damit eine realitätsnahe Lasterhöhung bei der Ausnutzung progressiver Federsteifigkeiten und Anschläge.

Jede Federstufe des Fahrzeugs bedarf einer **Dämpfung**. Während bei Elastomerfedern meist auf deren eigene Dämpfungswirkung gesetzt wird, benötigen Stahl- und Luftfedern zusätzliche Dämpfer, die in der Regel als Fluid-dämpfer mit linearer oder degressiver (und damit kraftbegrenzender) Kraft-Geschwindigkeits-Kennlinie ausgeführt sind und ebenso modelliert werden können.

Eine gute Abbildung der **Fahrwerksanlenkung** ist im vorliegenden Anwendungsfall unverzichtbar, da über die Anlenkung hohe Lasten in den Wagenkasten geleitet werden können. Sie umfasst bei klassischen Drehgestellen den Drehzapfen oder Drehkranz sowie gegebenenfalls zusätzliche Gleitflächen zur Aufnahme der Vertikallasten. Kritisch ist hier die Abbildung der in Drehzapfen oder Drehkranz übertragenen Wank- und Nickmomente. Bei Fahrwerken existieren unterschiedliche Anlenkkonzepte, um die vergleichsweise steife rotatorische Anbindung und die einhergehenden kleinen Ausdreh-

winkel sicherzustellen. Für die Lastsimulation ist hier eine korrekte Abbildung der Anlenkung entscheidend, um die hohen auf den Wagenkasten wirkenden Wendemomente sicher erfassen zu können.

3.4 Modellierung der Gelenke

3.4.1 Vorüberlegungen

Gelenke in Schienenfahrzeugen besitzen eine räumliche Ausdehnung und sind aus linearelastischen Werkstoffen gefertigt, vereinzelt kommen zusätzliche nichtlineare Bauelemente wie Elastomerlager zum Einsatz. Sie weisen daher grundsätzlich eine Elastizität auf, wodurch die kinematisch exakte Beschreibung eines Gelenks nicht der Realität entspricht, sondern eine Idealisierung darstellt.

Eine solche Idealisierung der Gelenke ist im vorliegenden Anwendungsfall – der Lastermittlung – nicht dienlich, da insbesondere keine inverse Kinematik berechnet werden soll, keine Aktuatoren an den Gelenken wirken und keine besonderen Forderungen an die Rechenzeit, wie zum Beispiel Echtzeitfähigkeit, gestellt sind. Für die Ermittlung von Schnittlasten in den Gelenken sind vielmehr realitätsnahe Gelenksteifigkeiten erforderlich, um künstliche Lastspitzen durch Zwangskräfte zu vermeiden. Sind Fahrzeuge in ihrer Gelenkkonfiguration statisch überbestimmt, ist das Verhältnis der Lagersteifigkeiten zueinander maßgeblich für die korrekte Aufteilung des Lastpfades und damit für die korrekte Lastermittlung.

Nachteile hoher Steifigkeiten im Modell sind durch moderne Solver, wie SODASRT2, hingegen nicht zu erwarten. Hieraus ist zu schlussfolgern, dass alle Gelenke des Fahrzeugs, zumindest aber jene zum Wagenkasten, nicht als explizite oder implizite kinematische Gelenke, sondern als Kraftelemente modelliert werden sollten.

3.4.2 Wagenkastengelenke

Moderne Multigelenkfahrzeuge zeigen hinsichtlich ihrer Wagenkastengelenke eine große Vielfalt an Bauformen. Die im Untergestell verbauten unteren Gelenke sind mit dem Ziel konzipiert, auf kleinem Raum große Ausdrehwinkel zu ermöglichen, und dabei zum Teil hohe Vertikallasten – beispielsweise einer beladenen Sänfte – zu stützen. In der Praxis sind verschiedene Formen von Sphärolagern und Drehkranzlagern zu finden. Teilweise sind auch mehrteilige Gelenke anzutreffen, bei denen Nick- und Ausdrehbewegung in unterschiedlichen Bauteilen realisiert sind. Die Ausdrehbewegung der Wagenkästen zueinander kann durch *Intercar-Dämpfer* gedämpft werden, welche einem Schlingern des Fahrzeugs entgegenwirken. Zur Begrenzung des Ausdrehwinkels werden Ausdrehanschläge eingesetzt, die als Elastomerfeder oder auch als Festanschlag ausgeführt sind.

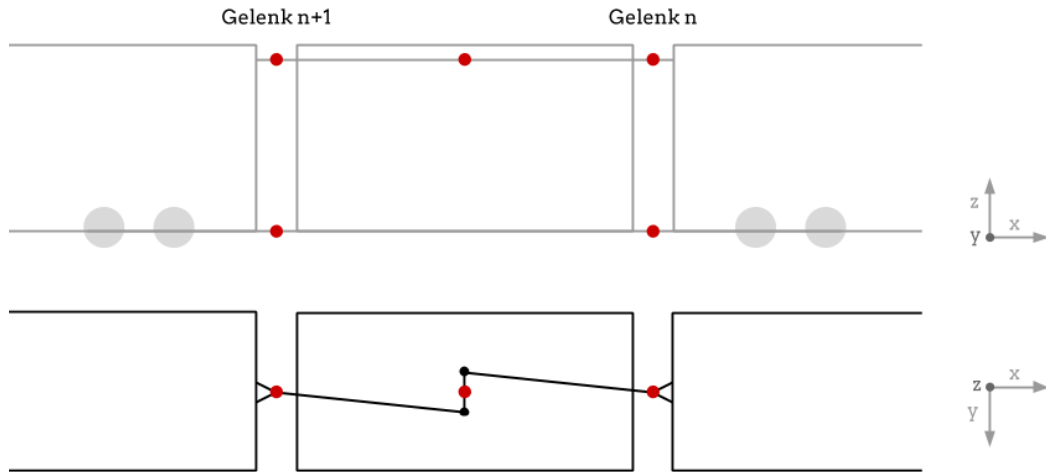


Bild 3.4: Nickaustgleich zwischen zwei Gelenken durch eine Dach-Lemniskate (Seitenansicht und Aufsicht, Lagerstellen am Wagenkasten in rot)

Zusätzlich zu den unteren Gelenken sind die Wagenkästen meist im Dachbereich durch obere Gelenke verbunden. Sie dienen im Allgemeinen der Reduzierung der Wankwinkel, indem unter anderem Kräfte durch die auf die Dachgeräte wirkenden Querbeschleunigungen an den benachbarten Wagenkästen abgestützt werden. Da in den oberen Gelenken zumindest teilweise auch Nickwege ermöglicht werden müssen, um bei langen Fahrzeugen die Anforderungen an Kuppen- und Wannenfahrt erfüllen zu können, kommen hier beispielsweise Querlenker in Betracht. Sollen zusätzlich auch geringe Querwege ermöglicht werden, um Torsionslasten zu reduzieren, sind Querdämpfer und eine Vielzahl weiterer Bauformen möglich. Diese besonderen Bauformen werden im Folgenden behandelt, da sie einen bedeutenden Einfluss auf die Wagenkastenbelastung ausüben.

3.4.3 Gelenke mit besonderer Kinematik

Im Straßenbahnbereich werden verschiedene Systeme eingesetzt, die bestimmte kinematische Bedingungen in den Gelenken forcieren. Lemniskatenlenker nach dem Aufbau des WATT-Mechanismus [RK76] führen so beispielsweise zu einem Nickaustgleich zweier Gelenke zwischen drei Wagenteilen. Bild 3.4 zeigt hierzu drei Wagenteile in der Aufsicht. Die drei Lenker des Mechanismus sind drehbar miteinander verbunden und an allen drei Wagenteilen jeweils drehbar gelagert. Die Geometrie sorgt für eine gleiche Verteilung des Nickwegs in den oberen Gelenken, was aus Gründen der Freigängigkeit hilfreich sein kann. Ebenso existieren Systeme zum Ausgleich der Wankwinkel [Hon07] und zur Aufteilung der Ausdrehwinkel [Pet10] zwischen benachbarten Gelenken.

Viele Gelenke basieren zunächst auf Annahmen, die sich auf das Fahrzeug auf geradem Gleis beziehen. Die Ausdrehwinkel zweier Wagenkästen zueinander können im

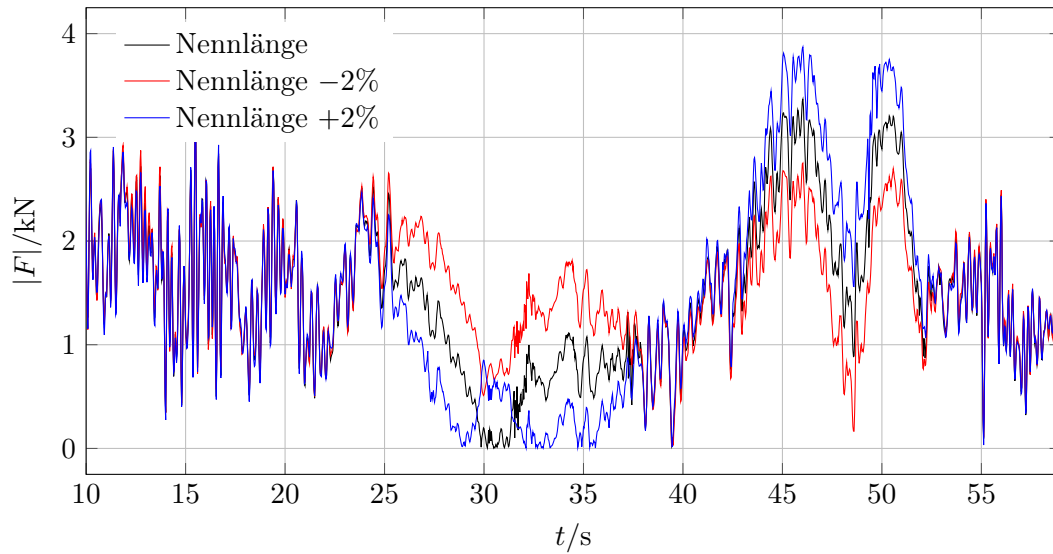


Bild 3.5: Gelenkkraft im oberen Gelenk einer Multigelenkstraßenbahn, Simulation einer S-Bogen-Durchfahrt, Parametervariation der Gelenklenkerlänge

Straßenbahnbereich jedoch bis zu etwa $\pm 30^\circ$ betragen. Je komplexer die eingesetzte Gelenkkinematik ist, desto eher entstehen Effekte wie Verspannungen aus Drehachsenversätzen und Längenänderungen, was zu erhöhten Lasten im Gelenkbereich führen kann. Bei bestimmten Gelenktypen können Längenabweichungen einzelner Komponenten erheblichen Einfluss auf die Gelenkkinematik haben. Dann sollte Wert darauf gelegt werden, die Sensitivität der simulierten Lasten auf mögliche Bauteiltoleranzen und Längeneinstellungen zu untersuchen. Ein Beispiel für eine solche Untersuchung zeigt Bild 3.5. Hier führt bereits eine kleine Änderung der Länge eines Gelenklenkers, im tatsächlich vorhandenen Einstellbereich, zu hohen Lastunterschieden.

3.5 Modellierung des Wagenkastens

Die Modellierung des Wagenkastens ist für die Ermittlung der Lasten auf selbigen von zentraler Bedeutung. In Folge der in Abschnitt 3.4.1 gewählten Gelenkarten besitzt er grundsätzlich alle sechs Freiheitsgrade zum Inertialsystem. Sie sollten den Wagenkasten im Gleiskoordinatensystem – und nicht im kartesischen Koordinatensystem – beschreiben, um die numerische Genauigkeit bei langen Simulationsstrecken zu erhöhen. Im Folgenden soll zunächst die stark vereinfachte Modellierung des Wagenkastens als Starrkörper und die für die Zeitschrittsimulation zu detaillierte Modellierung als elastisches Finite-Elemente-Modell betrachtet werden, um schließlich die Modellreduktion der elastischen Struktur und deren Einbindung in das Mehrkörpersystem zu beleuchten.

3.5.1 Modellierung als Starrkörper mit Ersatzsteifigkeiten

Betrachtet man den Wagenkasten als starren Körper, hat dieser zunächst nur drei wesentliche Eigenschaften: **Schwerpunktlage, Masse und Trägheitstensor**. Über die Messung von Radaufstandskräften kann die Gesamtmasse fertiggestellter Fahrzeuge sehr genau bestimmt werden. Eine Verwiegung der einzelnen Wagenkastenmassen ist jedoch an den ungetrennten Wagenkästen prinzipiell ausgeschlossen [Pan10] und die Trennung des ausgebauten Fahrzeugs zur Verwiegung insbesondere bei Straßenbahnen nicht gängig. Die Modellierung ist daher stark auf die Massekalkulation angewiesen, bei der die Masseverteilung der einzelnen Wagenkästen über die Ermittlung und Bilanzierung der Einzelmassen aller Bauteile bestimmt wird, wobei ein finaler Abgleich in der Regel fertigungsbedingt nur über die Gesamtmasse des Fahrzeugs, das heißt der ungetrennten Wagenkästen, möglich ist.

Da der Fokus bei der Auslegung der Fahrzeugmassen in der Regel auf der Einhaltung von Vertragsbedingungen, das heißt auf dem Erreichen eines Ziel-Gesamtgewichts und der Positionierung der Massenschwerpunkte für ausgeglichene Achslasten liegt, folgen die resultierenden **Massenträgheitsmomente** einer eher zufälligen Entwicklung. Auch deren Bestimmung wäre über die Bilanzierung der Trägheitsmomente aller Bauteile möglich, diese sind jedoch in der Regel nicht bekannt und insbesondere bei Zulieferern nicht spezifiziert. Naheliegender ist daher vor allem in der frühen Projektphase eine Abschätzung über Ersatzmodelle, beispielsweise die Betrachtung des Wagenkastens als homogenen Hohlquader mit den Hauptabmessungen des Wagenkastens l_x , l_y und l_z . Aus den Teilmassen der zusammengefassten Seitenflächen,

$$\begin{aligned} m_{xy} &= \frac{m l_x l_y}{l_x l_y + l_x l_z + l_y l_z} \\ m_{xz} &= \frac{m l_x l_z}{l_x l_y + l_x l_z + l_y l_z} \\ m_{yz} &= \frac{m l_y l_z}{l_x l_y + l_x l_z + l_y l_z}, \end{aligned} \tag{3.3}$$

ergeben sich daraus die auf den mit dem geometrischen Mittelpunkt identischen Massenschwerpunkt bezogenen Hauptträgheitsmomente

$$\begin{aligned} I_{xx}^{\text{WK}} &= \frac{1}{12} (m_{yz} (l_y^2 + l_z^2) + m_{xz} (l_z^2 + 3l_y^2) + m_{xy} (l_y^2 + 3l_z^2)) \\ I_{yy}^{\text{WK}} &= \frac{1}{12} (m_{xz} (l_x^2 + l_z^2) + m_{yz} (l_z^2 + 3l_x^2) + m_{xy} (l_x^2 + 3l_z^2)) \\ I_{zz}^{\text{WK}} &= \frac{1}{12} (m_{xy} (l_x^2 + l_y^2) + m_{yz} (l_y^2 + 3l_x^2) + m_{xz} (l_x^2 + 3l_y^2)). \end{aligned} \tag{3.4}$$

Gemeinsam mit der Annahme seiner Beladung als homogenen Vollquader mit den Hauptträgheitsmomenten

$$\begin{aligned} I_{xx}^{\text{Bel}} &= \frac{m^{\text{Bel}}}{12} (l_y^2 + l_z^2) \\ I_{yy}^{\text{Bel}} &= \frac{m^{\text{Bel}}}{12} (l_x^2 + l_z^2) \\ I_{zz}^{\text{Bel}} &= \frac{m^{\text{Bel}}}{12} (l_x^2 + l_y^2) \end{aligned} \quad (3.5)$$

ergibt sich dann für den beladenen Wagenkasten der Trägheitstensor

$$\mathbf{I}^{\text{WK, bel}} = \begin{pmatrix} I_{xx}^{\text{WK}} + I_{xx}^{\text{Bel}} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy}^{\text{WK}} + I_{yy}^{\text{Bel}} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz}^{\text{WK}} + I_{zz}^{\text{Bel}} \end{pmatrix}. \quad (3.6)$$

Es sei hier darauf hingewiesen, dass die Annahme eines zur Körpermitte symmetrischen Quaders im Widerspruch steht zu einem bekannt außermittig liegendem Schwerpunkt. Dieser Widerspruch lässt sich zum Beispiel auch nicht durch ein Verschieben des Trägheitstensors nach STEINER auflösen. Weiter ist die in der Praxis sehr häufig anzutreffende Hypothese, dass die Hauptträgheitsachsen des Wagenkastens und seiner Anbauteile parallel zu den Achsen des körperfesten Koordinatensystems stehen, kritisch zu hinterfragen. Vor allem an den zur y-z-Ebene stark asymmetrischen Kopfwagen, aber auch bei den bei Einrichtungsfahrzeugen zur x-z-Ebene stark asymmetrischen Mittelwagen, muss von einer nennenswerten Kippung der Hauptträgheitsachsen ausgegangen werden, was zu Deviationsmomenten in der Beschreibung im körperfesten Koordinatensystem führt. Diese zu beziffern erweist sich jedoch mangels robuster Daten als schwierig.

Entsprechende Unsicherheiten müssen daher zunächst in Kauf genommen werden oder bedürfen einer wesentlich detaillierteren Betrachtung der Trägheitseigenschaften aller Einzelmassen, wie sie aufgrund des hohen damit verbundenen Aufwands derzeit in der Praxis nicht gängig ist und auch in dieser Arbeit nicht umsetzbar war. Bei Lastfällen, die durch eine Rotation des Wagenkastens geprägt werden, wie zum Beispiel dem Wenden des Wagenkastens am Bogenanfang, ist der resultierende Fehler der ermittelten Lasten etwa proportional zum Fehler des angesetzten Trägheitstensors.

Die **Torsionssteifigkeit** der Wagenkästen um ihre Längsachse hat großen Einfluss auf die Entstehung von Radlastunterschieden auf verwundenem Gleis. Diese finden wiederum beispielsweise Berücksichtigung in den Berechnungen zur Entgleisungssicherheit und zur Wagenkastenbeanspruchung. Gängige Praxis ist es daher, diese Steifigkeit im MKS-Modell abzubilden, indem der starre Körper in zwei Teile geteilt, der zweite Kör-

per mit einem Drehfreiheitsgrad um die Längsachse an den ersten gefesselt und zwischen beiden Körpern ein Kraftelement mit einer Ersatztorsionssteifigkeit eingebunden wird. Diese Modellierung erfolgt in der Annahme, dass die Torsionsachse parallel zur Fahrzeuglängsachse liegt, was nur eine Näherung darstellt.

Die Torsionssteifigkeit kann am Rohbau des Wagenkastens gemessen oder näherungsweise im FE-Modell bestimmt werden, indem beispielsweise am Wagenkasten einer Sänfte an beiden unteren Gelenken und einem oberen Gelenk gelagert wird, während am zweiten oberen Gelenk eine Querkraft F_y vorgegeben und die resultierende Querverschiebung Δy gemessen wird. Die Torsionssteifigkeit ergibt sich in diesem Fall zu

$$c_t = \frac{\alpha}{M_t} = \frac{\Delta y}{F_y h^2}, \quad (3.7)$$

wobei h die Höhendifferenz beider Gelenke beschreibt, die längenbezogene Torsionssteifigkeit entsprechend zu

$$c_t^* = \frac{l\alpha}{M_t} = \frac{l\Delta y}{F_y h^2}, \quad (3.8)$$

wobei l den Gelenkabstand in Längsrichtung bezeichnet. An Wagenkästen mit Fahrwerk sind gesonderte Überlegungen für eine sinnvolle Lagerung nötig. An den Kopfwagen ist meist eine Lagerung an Fahrwerk und Gelenk vorzuziehen. Als der Torsionssteifigkeit zugehörige **Torsionsdämpfung** wird üblicherweise

$$d_t = D \cdot 2\sqrt{c_t I_{xx}} \quad (3.9)$$

mit einer natürlichen Dämpfung von $D = 2\%$ angenommen, vergleiche unter anderem [Chr09].

Masse $m^{\text{WK, bel}}$ und Trägheitstensor $\mathbf{I}^{\text{WK, bel}}$ dürfen beliebig auf die beiden Teilwagenkästen aufgeteilt werden, ohne dass sich das Trägheitsverhalten des Gesamtwagenkastens verändert, solange beide Schwerpunkte der Teilwagenkästen am selben Ort wie der Schwerpunkt des Gesamtwagenkastens definiert sind und von kleinen Torsionswinkeln ausgegangen wird. Um jedoch das Torsionsschwingverhalten des geschaffenen Zweimassenschwingers möglichst genau abzubilden, ist eine Aufteilung der Trägheitsmomente nach den modalen Massen der ersten Torsionsschwingung sinnvoll.

In der Gesamtheit betrachtet kann dieses Modellierungsverfahren als pragmatische – aber grobe – Näherung betrachtet werden. Es bildet vor allem das statische Torsionsverhalten des Gesamtfahrzeugs so ab, dass Federwege und Radaufstandskräfte auf verwundenem Gleis in ausreichender Genauigkeit ermittelbar sind, wobei diese Genauigkeit stark auf dem Erfahrungsschatz des Modellierers beruht. Wo große Abweichungen zu erwarten sind, wird in der Praxis oft mit zusätzlichen Starrkörpern oder Kraftele-

menten an den Krafteinleitungspunkten gearbeitet, die die lokalen Anbindungssteifigkeiten abbilden. Dass sich Lastpfade bei Schub- und Biegebelastungen über das Gesamtfahrzeug hinweg realitätsnah ausprägen, ist durch diese punktuell eingebrachten Modelleigenschaften praktisch nicht zu gewährleisten. Die Möglichkeiten, die das starre Mehrkörpersystem für die Modellierung bietet, sind damit jedoch im Wesentlichen ausgeschöpft. Zu Gute kommt der Modellierung, dass sie große Vorteile gegenüber der rein starren Wagenkastenmodellierung verspricht, ohne dabei einen nennenswerten Berechnungsmehraufwand zu verursachen.

Aus der Existenz dieser Art der Modellierung ist auch ein Konsens darin abzulesen, dass die Modellierung des Wagenkastens als einzelner Starrkörper zu unzureichenden Ergebnissen führt. Als Konsequenz muss der Wagenkasten in der Simulation als elastischer Körper betrachtet werden. Die Bewegung elastischer Körper lässt sich allgemein als partielles Differentialgleichungssystem (PDE) beschreiben, das sich bei Körpern mit komplexer Geometrie nicht analytisch, aber über eine Reihe numerischer, auf örtlicher Diskretisierung beruhender Verfahren, lösen lässt.

3.5.2 Modellierung mit der Finite-Elemente-Methode

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist Stand der Technik für die Berechnung elastischer, unregelmäßiger Körper, die sich einer analytischen Betrachtung entziehen. Für die Grundlagen der FEM existiert ein großes Literaturangebot, beispielsweise [ZTZ05].

In der Schienenfahrzeugtechnik erfolgt mit Hilfe der FEM unter anderem die Festigkeitsauslegung der Wagenkästen. Hierbei werden die kontinuierlichen Flächen und Volumina der Rohbaustuktur aus CAD-Zeichnungen entwickelt und örtlich diskretisiert. Es entsteht eine endliche Menge an Elementen, die über Randbedingungen miteinander verknüpft sind und die sich jeweils über einfache Ansatzfunktionen analytisch berechnen lassen. Dabei existiert eine Vielzahl einsetzbarer Elementtypen, die sich in ihren Ansatzfunktionen unterscheiden. Hervorgehoben seien hier zweidimensionale Schalenelemente mit dem Knotenfreiheitsgrad 6, da sie für die Modellierung der Blechstrukturen des Wagenkastens von zentraler Bedeutung sind. Bild 3.6 zeigt ein Beispielmmodell.

Anhand des Finite-Elemente-Modells (FE-Modells) lassen sich Beanspruchungen, das heißt Dehnungen und Spannungen, am Wagenkasten ermitteln. Die Belastung kann dabei in Form von äußeren Kräften und Momenten an den physisch vorhandenen Schnittknoten, wie zum Beispiel den Wagenkastengelenken, vorgegeben werden. Die Summe dieser Schnittlasten ist im Allgemeinen ungleich Null, da sie nicht die Massenträgheitslasten umfassen, die ebenfalls auf die Struktur wirken. FEM-Werkzeuge bieten in der Regel die Möglichkeit, das ungefesselte Modell dennoch zu berechnen, indem diese fehlenden Anteile ermittelt und dergestalt auf die Elementknoten verteilt werden, dass

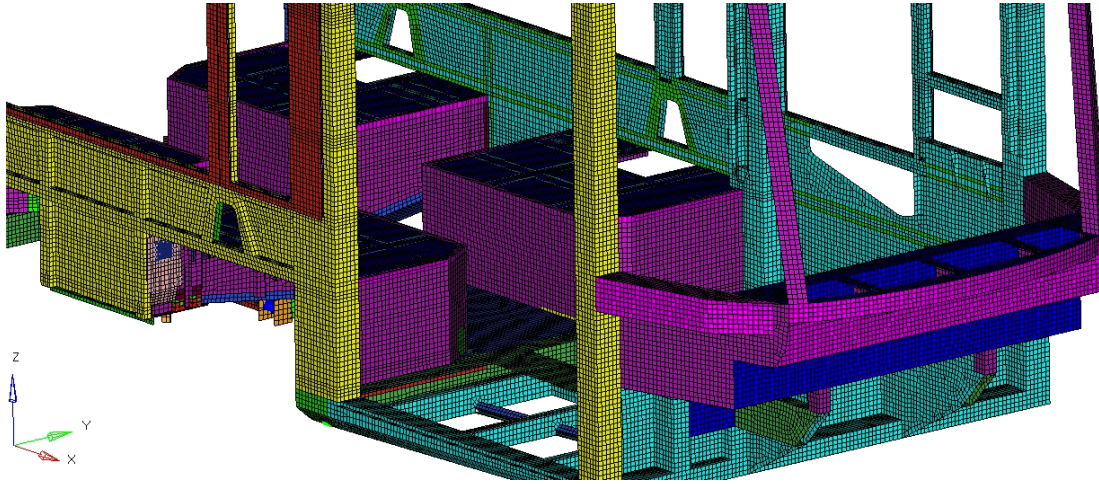


Bild 3.6: Modell eines Wagenkastens nach der Finite-Elemente-Methode, Ausschnitt

ein Kräfte- und Momentengleichgewicht herrscht. Dies wird unter anderem als *Inertia Relief*-Methode [Bar95] bezeichnet.

Das so erstellte FE-Modell bildet zunächst nur die Rohbaumasse ab. Die Wagenkastenmasse setzt sich jedoch aus der Masse des Rohbaus, der Dachaggregate, des Innenausbaus und der Beladung zusammen. In der Praxis werden daher zusätzliche Massen eingefügt. Dies erfolgt zum Beispiel für Dachaggregate und Beladung meist über Stabspinnen (wie ROD-Elemente) oder Zwangsbedingungen (wie RBE3-Elemente) angebundene Punktmassen. Verbleibende Massedifferenzen, zum Beispiel für Innenausbau und Betriebsmittel, werden oft über die Hochskalierung der Materialdichte ausgeglichen. Im Hinblick auf die Trägheitsmomente gelten prinzipiell die gleichen Aspekte wie in Abschnitt 3.5.1. Während die Trägheitsmomente des Rohbaus vergleichsweise genau und inklusive der Deviationsmomente im Modell abgebildet sind, bestehen hohe Unsicherheiten bei der Beschreibung der Trägheitsmomente anderer Massen, insbesondere wenn diese als Punktmassen definiert sind.

Ein Modell nach der Methode der Finiten Elemente lässt sich unter der Annahme eines linear elastischen Materialgesetzes als Differentialgleichungssystem 2. Ordnung in der Form

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{K}\mathbf{z} = \mathbf{F} \quad (3.10)$$

oder mit linearer, geschwindigkeitsabhängiger Dämpfung in der Form

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{z}} + \mathbf{K}\mathbf{z} = \mathbf{F} \quad (3.11)$$

angeben. Anhand dieser Systemmatrizen kann das FE-Modell grundsätzlich auch in das Mehrkörpersystem eingebunden werden [Kou09]. Praktisch scheitert dies jedoch

daran, dass der Freiheitsgrad des FE-Modells eines einzelnen Wagenkastens etwa um den Faktor 10^4 höher ist als der Gesamtfreiheitsgrad des starren Mehrkörpersystems des Gesamtfahrzeugs. Eine Zeitschrittsimulation mit einem geeigneten Solver ist daher zwar theoretisch möglich, mit der heutigen Rechentechnik jedoch ausgeschlossen.

3.5.3 Modellierung als ordnungsreduzierte elastische Struktur

Die Modellordnungsreduktion hat ihre Ursprünge in der Systemtheorie und insbesondere in der Regelungstechnik, um Gleichungssysteme dynamischer Modelle in der Größenordnung von 10^5 bis 10^9 Freiheitsgraden so weit zu reduzieren, dass sie mit geringen Rechenzeiten – oft mit Echtzeitanforderung – lösbar sind, dabei das dynamische Verhalten des nichtreduzierten Modells aber in ausreichender Genauigkeit abbilden.

Da ihre Prinzipien auf beliebige Modelle anwendbar sind, die auf gewöhnlichen Differentialgleichungssystemen (ODE) beruhen, finden diese in vielen ingenieurtechnischen Domänen Anwendung [SRV08]. Im vorliegenden Fall besteht das Ziel darin, die den jeweiligen Wagenkasten abbildenden Starrkörper durch eine aus dem FE-Modell gewonnene, in ihrem Freiheitsgrad reduzierte, elastische Struktur zu ersetzen, wie es Bild 3.7 veranschaulicht.

Hierfür ist es zunächst notwendig, die Knoten des FE-Vollmodells aufzuteilen in jene, deren Freiheitsgrade im reduzierten Modell verbleiben sollen (*Masterknoten*) und jene, deren Freiheitsgrade im reduzierten Modell nur in Abhängigkeit der übrigen beschrieben werden (*Slaveknoten*). Als Masterknoten müssen mindestens alle Schnittknoten gewählt werden, an denen äußere Kräfte auf den Wagenkasten wirken.

Weiter muss nun eine Transformationsmatrix gefunden werden, die die Freiheitsgrade des Vollmodells, bestehend aus Master- und Slavefreiheitsgraden, in Beziehung zu den Masterfreiheitsgraden setzt. Diese Beziehung kann durch

$$\mathbf{z} = \begin{pmatrix} \mathbf{z}_m \\ \mathbf{z}_s \end{pmatrix} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{z}_m \quad (3.12)$$

ausgedrückt werden. Das Finden einer geeigneten Transformationsmatrix ist die Kernaufgabe der Modellordnungsreduktion.

Im Allgemeinen müssen zunächst die Bewegungsgleichungen des Vollmodells nach Master- und Slavefreiheitsgraden umsortiert werden. Ohne dass dies zu einer Modellveränderung führt, erhält man auf diese Weise für das ungedämpfte Vollmodell das Gleichungssystem

$$\begin{pmatrix} \mathbf{M}_{mm} & \mathbf{M}_{ms} \\ \mathbf{M}_{sm} & \mathbf{M}_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{z}}_m \\ \ddot{\mathbf{z}}_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{K}_{mm} & \mathbf{K}_{ms} \\ \mathbf{K}_{sm} & \mathbf{K}_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{z}_m \\ \mathbf{z}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_m \\ \mathbf{F}_s \end{pmatrix}. \quad (3.13)$$

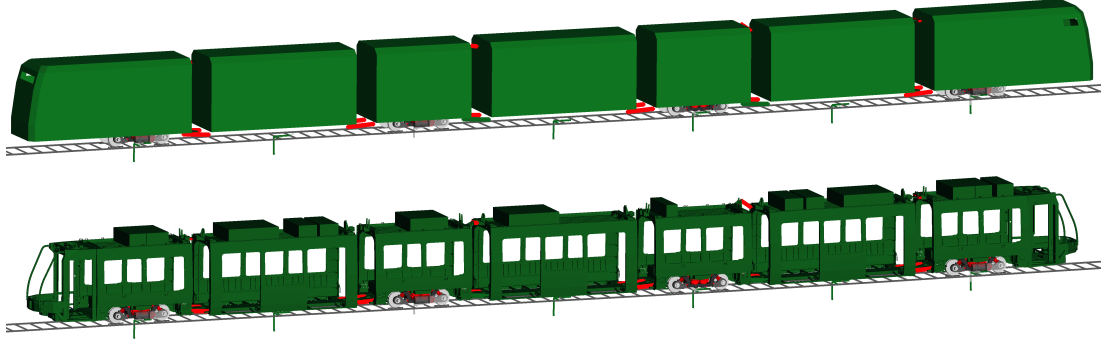


Bild 3.7: Visualisierung des Mehrkörpersystemmodells einer Multigelenkstraßenbahn mit Starrkörper-Wagenkästen (oben), Einbindung der Wagenkästen als elastische Struktur (unten)

Da im Sinne der Reduktion an den internen Slavefreiheitsgraden keine äußeren Kräfte wirken können, gilt grundsätzlich

$$\mathbf{F}_s = 0. \quad (3.14)$$

Die Ermittlung der Transformationsmatrix kann für den statischen Fall mit Hilfe der **statischen Kondensation** erfolgen. Da für diesen Fall $\ddot{\mathbf{z}} = 0$ gilt, entfällt der Term der Trägheitskräfte. Zusammen mit Formel 3.14 kann Formel 3.13 daher

$$\begin{pmatrix} \mathbf{K}_{sm} & \mathbf{K}_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{z}_m \\ \mathbf{z}_s \end{pmatrix} = \mathbf{F}_s = 0 \quad (3.15)$$

entnommen, nach \mathbf{z}_s umgestellt und in Formel 3.12 eingesetzt werden, wodurch sich die statische Transformationsmatrix

$$\mathbf{T}_{\text{stat}} = \begin{pmatrix} \mathbf{I} \\ -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \cdot \mathbf{K}_{sm} \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

ergibt. Überführt man die Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} des Vollmodells mit Hilfe der Transformationsmatrix in die Steifigkeitsmatrix

$$\mathbf{K}_{\text{red}} = \mathbf{T}_{\text{stat}}^T \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{\text{stat}} \quad (3.17)$$

des reduzierten Modells, so erhält man das reduzierte statische Modell

$$\mathbf{K}_{\text{red}} \mathbf{z}_m = \mathbf{F}_m, \quad (3.18)$$

welches die statischen Eigenschaften des Vollmodells exakt abbildet.

Die der **GUYAN-Reduktion** zugrunde liegende Annahme besagt nun, dass auch die Massenmatrix \mathbf{M}_{red} und unter bestimmten Voraussetzungen die Dämpfungsmatrix \mathbf{D}_{red} analog zu Formel 3.17 nach

$$\mathbf{M}_{\text{red}} = \mathbf{T}_{\text{stat}}^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{T}_{\text{stat}} \quad \text{und} \quad \mathbf{D}_{\text{red}} = \mathbf{T}_{\text{stat}}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{T}_{\text{stat}} \quad (3.19)$$

gewonnen werden können, um das reduzierte dynamische Modell

$$\mathbf{M}_{\text{red}} \ddot{\mathbf{z}}_m + \mathbf{D}_{\text{red}} \dot{\mathbf{z}}_m + \mathbf{K}_{\text{red}} \mathbf{z}_m = \mathbf{F}_m \quad (3.20)$$

zu erhalten, das das Vollmodell zumindest im niedrigen Frequenzbereich in guter Näherung abbildet.

Um das dynamische Verhalten des Vollmodells über einen größeren Frequenzbereich zuverlässig nachzubilden, besteht eine Vielzahl dynamischer Reduktionsmethoden, die in der Regel auf der statischen Kondensation aufbauen. Ein Vertreter hierfür ist die neben dem GUYAN-Verfahren häufig in FE-Software implementierte *Component Mode Synthesis* (CMS). Bei dieser wird der Zustandsvektor um nichtphysikalische Knoten erweitert, um die CRAIG-BAMPTON-Moden [BC68] abzubilden, die am Vollmodell unter Sperrung der Masterfreiheitsgrade, das heißt unter $\mathbf{z}_m = \dot{\mathbf{z}}_m = 0$, ermittelt werden können.

Welchen Einfluss die Wahl der Reduktionsmethode auf die Lastsimulation besitzt, hängt erwartungsgemäß von den Frequenzen ab, mit denen das Fahrzeug maßgeblich angeregt wird. So kann eine diesbezügliche Untersuchung in [Bei12] bei der Lastsimulation auf gemessenem Gleis erst bei sehr hohen Fahrgeschwindigkeiten überhaupt Lastunterschiede ausmachen. Ist die Anregung von sehr niedriger Frequenz, wie die ungestörte Queranregung bei einer Bogendurchfahrt, von quasistatischer Natur, wie bei Stehen oder Fahren auf verwundenem Gleis, oder gar rein statisch, wie bei bestimmten Anhebelastfällen, können demnach bereits mit guyanreduzierten Wagenkästen sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Untersuchungen in [Imm14] untersetzen diese Annahmen mit der Erkenntnis, dass die optimale Abbildung der Wagenkasteneigenmoden deutlich geringere Auswirkungen auf die Schnittlasten aufzeigt als beispielsweise eine korrekte Schwerpunktlage.

Bei der Nutzung dynamischer Reduktionsmethoden muss beachtet werden, dass die verbesserte dynamische Abbildung teilweise auf Kosten der statischen Abbildung erreicht wird, was die Ergebnisqualität bei den genannten, sehr relevanten Lastfällen auch vermindern kann. Die Verfeinerung der Reduktionsmethode birgt dennoch weitere Verbesserungspotenziale für die Lastsimulation, sie ist jedoch als eigenständiges Forschungsgebiet zu begreifen. Für einen derzeit vollständigen Überblick sei auf [Kou09]

verwiesen, für aktuelle Arbeiten auf [LB12b], [Len14] und [Mül14]. Von Vorteil ist in diesem Zusammenhang, dass eine Änderung der Schnittstelle zwischen elastischen Strukturen und dem Mehrkörpersystem nicht zu erwarten ist. Diese besteht stets aus drei Systemmatrizen pro Wagenkasten sowie der Lage der physischen Masterknoten. Weiter sind alle Anpassungen, die am MKS-Modell, der Lastfallsimulation und der Festigkeitsbewertung notwendig sind, um statisch reduzierte elastische Wagenkästen handhaben zu können, sind auch hinreichend für alle mit alternativen Methoden reduzierten Modelle. Diese grundsätzlichen Modellierungsschritte werden im Folgenden beschrieben.

3.6 Erstellung des Gesamtmodells für die Lastsimulation

Für den Aufbau des Gesamtmodells ist eine systematische Beschreibung der Schnittstellen zwischen Wagenkasten und Gesamtmodell essentiell. Sie definiert zum einen die Masterknoten sowie Anbindungsknoten für die Einbindung elastischer Wagenkästen. Zum anderen muss sie eine vollständige Beschreibung der von außen auf den Wagenkasten wirkenden Schnittlasten ermöglichen. Insbesondere bei Berücksichtigung der Vorüberlegungen in Abschnitt 3.4.1 ist ein vollständiger Freischnitt des Wagenkastens an Kraftelementen möglich.

3.6.1 Systematisierung der Schnittknoten und Schnittlasten

Die Beschreibung der Wagenkastenschnittstelle soll auf so allgemeine Weise erfolgen, dass zumindest für den Bereich der Straßen- und Stadtbahnen eine einheitliche und stets eindeutige Anwendung möglich ist. Dies erfordert eine durchgängige Bezeichnung aller Schnittknoten. Werden hierfür Ganzzahlen verwendet, ist die Bezeichnung sowohl als Knotennummer im FE-Modell und entsprechend in der Masterknotenauswahl, als auch als Markerbezeichnung im MKS-Modell anwendbar. Nur so ist eine durchgängige Verwendung möglich. Dennoch sind hier sehr viele Schemata denkbar. Im Bereich der Straßen- und Stadtbahnen erfüllt beispielsweise das in Tabelle 3.2 gezeigte Nummernschema die hier wesentlichen Anforderungen, wie eine variable Anzahl an Wagenkästen, Wagenkästen ohne oder mit ein oder zwei Drehgestellen oder Fahrwerken, typische Fahrwerksanbindungen, typische Gelenkanordnungen und weitere mögliche Krafteinleitungspunkte.

Schnittknoten besitzen eine Lage im körperfesten Koordinatensystem des Wagenkastens. Dieses Koordinatensystem kann in der Praxis sehr unterschiedlich definiert sein. Gebräuchlich sind konstruktionsseitig und FE-seitig Rechtssysteme mit nach oben gerichteter z-Achse sowie Lageangaben in Millimeter, während MKS-seitig mit Rechtssystemen mit nach unten gerichteter z-Achse sowie SI-Basiseinheiten gearbeitet wird.

Tabelle 3.2: Beispiel für eine systematische Nummerierung der Wagenkasten-Schnittknoten (Ziffern 1 bis 5) und Wagenkasten-Schnittlasten (Ziffern 1 bis 6)

Ziffer 1		Ziffer 2		Ziffer 3		Ziffer 4		Ziffer 5		Ziffer 6	
Wagenteil		Bauteil		Längslage		Querlage		Last			
1	WT 1	0	Wagenkasten	1	Gelenk unten	0	Mitte	0	Mitte	1	F_x
2	WT 2			2	Gelenk oben	1	vo	1	li	2	F_y
3	WT 3			3	Intercar-Dämpfer	2	hi	2	re	3	F_z
4	WT 4			4	Absetzstelle	3	vo vo	3	li li	4	M_{xx}
5	WT 5			5	Anhebestelle	4	hi hi	4	re re	5	M_{yy}
6	WT 6	1	Fahrwerk 1	1	Sekundärfeder					6	M_{zz}
7	WT 7	2	Fahrwerk 2	2	Vertikaldämpfer						
				3	Wankstütze						
				4	Queranschlag						
				5	Querdämpfer						
				6	Anlenkung						
				7	Drehzapfen						
				8	Gleitstück						

Typische Ursprungskoordinaten sind vertikal die Schienenoberkante, lateral die Fahrzeugmitte und längs der Fahrzeugmittelpunkt, die Gelenkpunkte oder die Wagenkastenmittelpunkte. Diese Faktoren erschweren den Abgleich der Schnittknotenlagen vor der Modellzusammenführung, der jedoch unverzichtbar ist. Im Rahmen der Arbeit sind verschiedene Werkzeuge entstanden, um Schnittknotenübersichten in unterschiedlichen Bezugssystemen zu erstellen, diese Schnittknotenlagen zu vergleichen und zu plausibilisieren.

Diese Werkzeuge wurden fest in den später beschriebenen Gesamtprozess eingebunden und ermöglichen eine fortwährende Überprüfung des Gesamtmodells und seiner MKS- wie FE-seitigen Teilmodelle. Die Schnittknotennummern können dabei automatisch einem Ort zugewiesen und dargestellt werden, ein Beispiel zeigt Bild 3.8.

Die Schnittknotenbeschreibung kann, wie bereits Tabelle 3.2 zeigt, um eine sechste Ziffer erweitert werden, um die an einem Schnittknoten auf den Wagenkasten wirkende Schnittlastkomponenten zu beschreiben. Auf diese Weise ist die korrekte Lastzuordnung in allen Modellbereichen sichergestellt.

3.6.2 Ermittlung der Schnittlasten

Allgemein müssen Kräfte – und damit auch die Schnittlasten – im Mehrkörpersystem abhängig von der Modellierungsart ermittelt werden. Bei Kraftelementen dienen Systemzustand und das jeweilige Kraftgesetz als Quelle, bei eingeschränkten Gelenkfreiheitsgraden und bei kinematischen Zwangsbedingungen die jeweilige Zwangskraft.

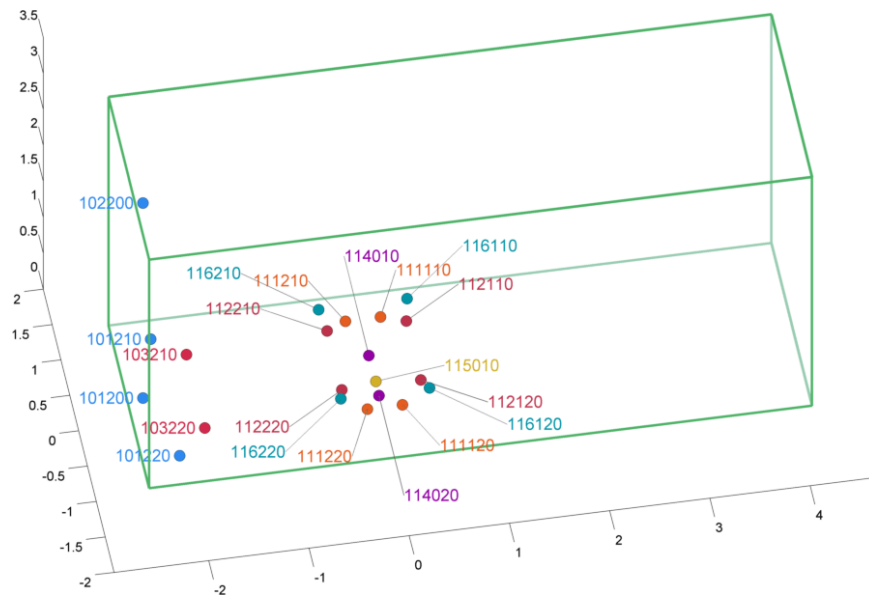


Bild 3.8: Abstrahierte Darstellung aller Schnittknoten des Kopfwagens einer Straßenbahn (automatisch generiert zur Überwachung des Einbindungsprozesses)

Nach der vorgeschlagenen Modellierung für die Wagenkastengelenke verbleibt nur der erste Fall. Die Ermittlung kann daher in Simpack mit Hilfe der Funktion **ForceAF** erfolgen. Diese kann in einer *Expression* genutzt werden und gibt eine einzelne Komponente eines Kraftelements aus. Dabei ist anzugeben, in welchem der beiden beteiligten Punkte die Last ermittelt und in welches Koordinatensystem sie transformiert werden soll. Für das vollständige Auslesen von n Schnittlasten müssen demnach $6n$ Expressions erstellt werden, was unbedingt automatisiert erfolgen sollte, um manuelle Zuordnungs- und Richtungsfehler auszuschließen.

Für die Ausgabe der Expressions ist in Simpack ihre Einbindung in *Result Elements* nötig. Hier müssen alle Expressions einzeln hinterlegt werden. Auch dies wurde im Rahmen der Arbeit automatisiert, um Fehler zu vermeiden und den Modellierungsprozess zu beschleunigen. Result Elements werten die Expressions zu jedem Zeitschritt aus und schreiben deren Werte in die Ergebnisdatei.

3.6.3 Prozessablauf für die Bildung des Gesamtmodells

Bild 3.9 zeigt den grundlegenden Prozessablauf im Laufe eines Fahrzeugprojekts, der erforderlich ist, um zu einem Gesamtfahrzeugmodell als Mehrkörpersystem mit eingebundenen elastischen Wagenkästen zu gelangen. Dabei existieren üblicherweise bereits früh in der Projektphase erste FE-Modelle sowie starre MKS-Modelle. Diese können mitunter aus Vorgängerprojekten abgeleitet sein, ihre Parametrierung basiert auf frühen Projektunterlagen.

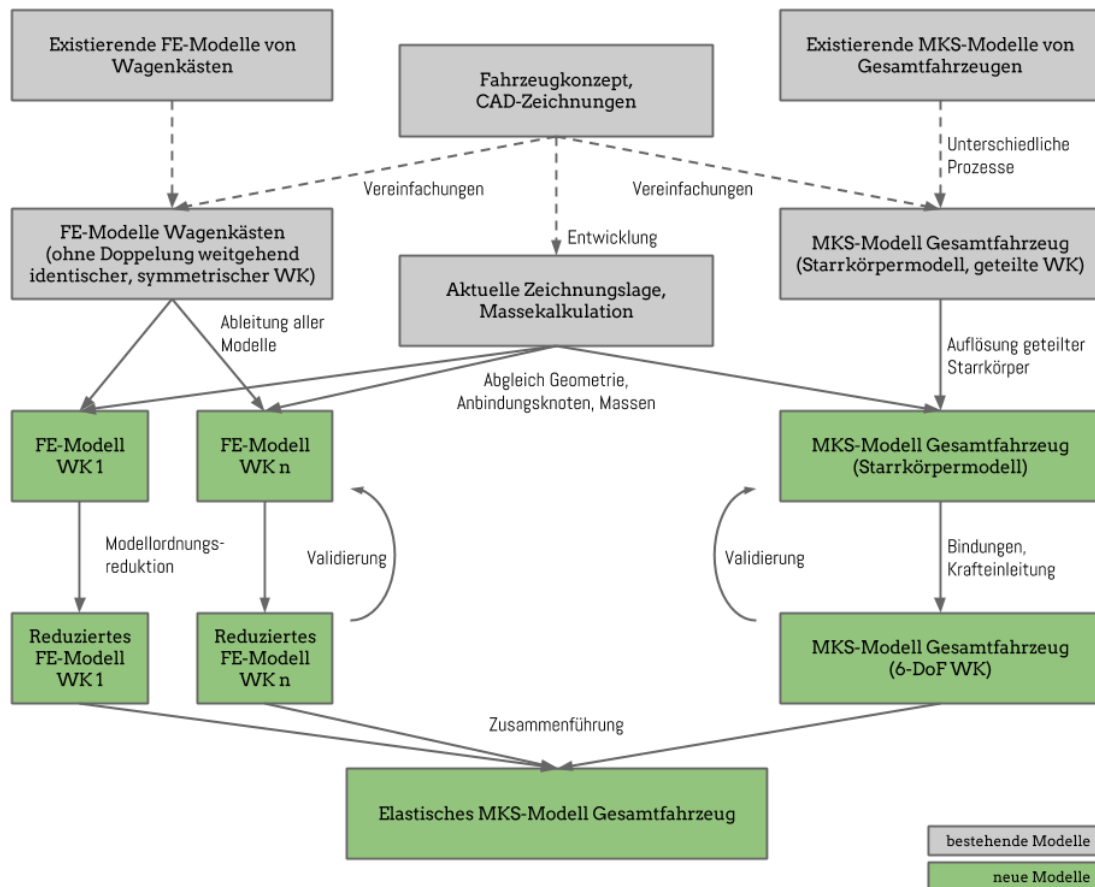


Bild 3.9: Prozessablauf für die Fahrzeugmodellierung als elastisches Mehrkörpersystem

Die FE-Modelle dienen an dieser Stelle ursprünglich der Festigkeitsauslegung und bilden daher einen *Worst-Case-Fall* ab. Sind, wie es meist der Fall ist, symmetrische Strukturen oder Wagenkästen vorhanden, werden daher nur jene Fälle im Modell abgebildet, die nach sachkundigem Ermessen zu den höheren Strukturbeanspruchungen führen. Bei zwei weitgehend symmetrischen Kopfwagen unterschiedlicher Masse würde so nur der schwerere für die Berechnung herangezogen.

Die MKS-Modelle dienen zu diesem frühen Zeitpunkt der Untersuchung des Fahrzeuglaufverhaltens. Hierfür ist die Verteilung der Lastpfade weitgehend unerheblich. Vorrangig sind jene Eigenschaften des Wagenkastens abgebildet, die Auswirkungen auf die Radlastverteilung haben – das sind Masse, Schwerpunkt, Trägheitsmomente und Torsionssteifigkeit. Damit ist auch die Nutzung starrer Körper zu diesem Zeitpunkt begründet.

Soll nun aus diesen Modellen ein elastisches MKS-Modell für die Lastberechnung gebildet werden, ist es zunächst einmal notwendig, bestehende FE-Modelle zu vervielfältigen und aus ihnen ein FE-Modell für jeden Wagenkasten abzuleiten, das diesen

mit der wagenkastenspezifischen Orientierung, Masseverteilung, Dachgeräteanordnung und Gelenkkonfiguration abbildet. Zugleich ist es erforderlich, das MKS-Modell auf die Einbindung der elastischen Strukturen vorzubereiten. Hierzu sind vorhandene Ersatzsteifigkeiten und die durch diese bedingten Zusatzkörper aus dem Modell zu entfernen, sodass jeder Wagenkasten durch einen einzelnen Starrkörper abgebildet wird.

Aufgrund unterschiedlicher Modellursprünge, Modellvereinfachungen und Untersuchungsziele kann zu diesem Zeitpunkt nicht angenommen werden, dass die Lage der Schnittknoten mit der nötigen Genauigkeit übereinstimmt. Daher ist ein Modellabgleich beider Modelle mit einem identischen Fahrzeugentwicklungsstand notwendig.

Anschließend ist die Modellordnungsreduktion der FE-Modelle nach Abschnitt 3.5.3 durchzuführen, während das MKS-Modell derart gestaltet werden sollte, dass die Wagenkästen ungebunden sind, also sechs Freiheitsgrade aufweisen. Insbesondere ist die realitätsnahe elastische Modellierung der Wagenkastengelenke als Kraftelemente notwendig. Auf beiden Seiten sollten die Modelle mit den unveränderten Referenzmodellen validiert werden, um sicher zu stellen, dass das reduzierte FE-Modell im niederfrequenten Bereich die Eigenschaften des Vollmodells abbildet beziehungsweise das veränderte MKS-Modell mit der nun komplexeren Modellierung das gleiche Verhalten wie das Ausgangsmodell aufweist. Das starre MKS-Modell muss das Leergewicht des Fahrzeugs abbilden, damit sich die nominellen Kräfte in allen Federstufen nach Abschnitt 3.3.3 bestimmen lassen.

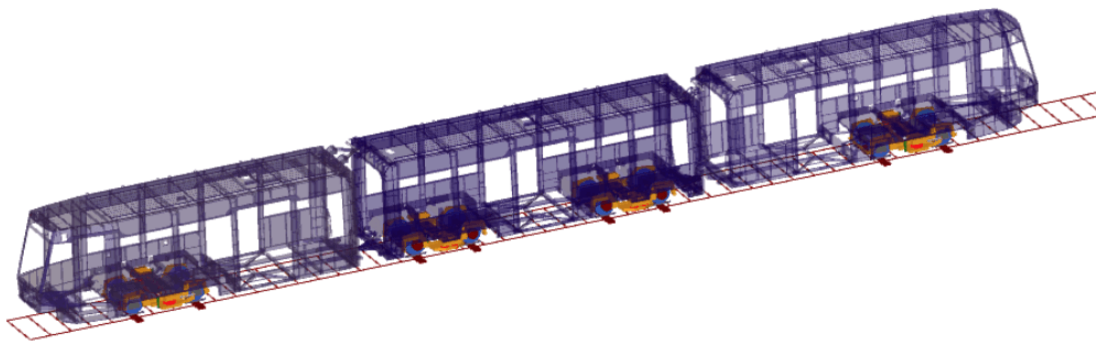


Bild 3.10: Mehrkörpersystemmodell einer Straßenbahn mit Einbindung der Wagenkästen als elastische Struktur

Abschließend können die reduzierten FE-Modelle in das MKS-Modell eingebunden werden. Dies erfolgt in Simpack beispielsweise mit Hilfe der Simpack-Präprozessoren `pch2fbi` und `FEMBS` – ausführlich werden diese Arbeitsschritte in [Har12] dargestellt. Zur Veranschaulichung zeigt Bild 3.10 ein nach dem in diesem Kapitel gezeigten Schema erstelltes Gesamtmodell einer dreiteiligen Straßenbahn mit klassischen Drehgestellen.

4 Simulation von Lastfällen

Das Ziel der Simulation von Lastfällen ist, die im Betrieb auf die Wagenkastenstrukturen wirkenden Lasten möglichst genau vorherzusagen, um aus diesen die relevanten Lastannahmen für die Festigkeitsauslegung abzuleiten (vgl. Bild 4.1). Nachdem im vorhergehenden Kapitel die für das Erreichen dieses Ziels geeignete Modellbildung diskutiert wurde, schließt sich nun die Frage an, welche Simulationsläufe mit dem so gewonnenen Modell durchgeführt werden müssen.

Hierfür müssen aus den unbegrenzten Fahrzeuganforderungen der Realität eine begrenzte Anzahl an Lastfällen identifiziert und in der Simulation abgebildet werden.

Da die starke Abstrahierung, Vereinfachung, und Linearisierung der hohen geometrischen, kinematischen und dynamischen Komplexität moderner Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge und ihrer Infrastruktur in der Vergangenheit mitunter zu unzulänglichen Lastannahmen geführt haben, sollte das Hauptbestreben der Lastfallsimulation in einer möglichst vollständigen und realitätsnahen Abbildung tatsächlicher Lastfälle bestehen.

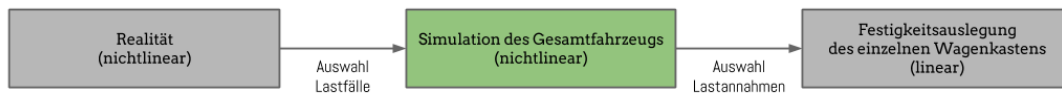


Bild 4.1: Einordnung der Begriffe Lastfälle und Lastannahmen in dieser Arbeit

Dafür werden in den folgenden Abschnitten die auftretenden Lastfallarten typisiert und ihre Eingangsparameter bestimmt. Da in der Folge eine große Anzahl an Lastfällen betrachtet werden muss, sollte die Lastfallgenerierung, Simulation und Auswertung einen hohen Automatisierungsgrad besitzen. Mögliche Vorgehensweisen, um diesen zu erzielen, werden im abschließenden Abschnitt aufgezeigt.

4.1 Lastfälle auf Basis synthetischer Gleislage

Synthetische Szenarien bilden einfache Grundlastfälle ab, die Stadt- und Straßenbahnen regelmäßig ertragen müssen. Dazu gehören insbesondere die Fahrt durch enge, überhöhungsfreie Bögen, über Kuppen und durch Wannen mit vergleichsweise kleinen Vertikalradien, durch Bögen in einer Steigung oder einem Gefälle und durch S-Bögen mit kurzen

Zwischengeraden. Die Szenarien können folglich aus kartografischen Grundelementen aufgebaut werden. In der Horizontalen sind dies Gerade (keine Krümmung), Bogen (konstante Krümmung) und Bogenübergang (Krümmungsänderung). In der Vertikalen sind es Ebene/Steigung/Gefälle (keine Vertikalkrümmung), Kuppe/Wanne (konstante Vertikalkrümmung) sowie der zugehörige Übergangsbogen (Vertikalkrümmungsänderung). Hinzu kommt der Verlauf der gegenseitigen Höhenlage zur Vorgabe der Gleisüberhöhung (konstante Höhendifferenz) und der zugehörigen Überhöhungsrampen (Änderung der Höhendifferenz). Indem diese Grundelemente aneinandergefügt und gegebenenfalls auch überlagert werden, ergeben sich Wegverläufe für Horizontalkrümmung, Vertikalkrümmung und Überhöhung eines Lastfalls.

In der geplanten Neuausgabe der VDV-Richtlinie 152 wird erstmalig die Simulation des Fahrzeugs auf solchen synthetischen Trassierungen vorgeschrieben. Dabei werden die folgenden Szenarien vorgeschlagen:

- (1) Enge Bögen ohne Übergangsbögen;
- (2) Enge Bögen mit Übergangsbögen;
- (3) Enge C-Bögen ohne Übergangsbögen und mit unterschiedlichen Zwischengeraden;
- (4) Kurze S-Bögen und Gleiswechsel ohne Übergangsbögen;
- (5) S-Bögen mit Übergangsbögen, maximaler Überhöhung und maximaler Verwindungsrampe;
- (6) Kuppe-Wanne-Abfolge mit maximalem Vertikalradius und maximaler Gradienten;
- (7) Bogenfahrt mit maximaler Überhöhung und einem Radius, der die maximale Fahrgeschwindigkeit ermöglicht;
- (8) Bogen ohne Überhöhung, jedoch mit Gefälle oder Steigung.

Die Szenarien müssen auftragsspezifisch so angepasst werden, dass kritische netzabhängige Grenzwerte abgedeckt werden. Dazu gehören insbesondere der kleinste Bogenradius, der kleinste Vertikalradius, die größte Steigung, die größte gegenseitige Höhenlage, die größte Steigung der Überhöhungsrampe und die kürzeste Zwischengerade im S-Bogen. Im Gegenzug sollten auch Parameterwerte, die für ein Gleisnetz ausgeschlossen werden können, aus der Berechnung herausgenommen werden, um eine Überdimensionierung der Wagenkastenstrukturen zu vermeiden.

Fahrzeuge im Bereich der Straßen- und Stadtbahnen sind im Bezug auf die Fahrzeugseite oft nicht flächensymmetrisch gestaltet. Die Unterschiede können grundlegender Natur sein, zum Beispiel bei Einrichtungsfahrzeugen mit *Türseite* und *Fensterseite*, oder nur im Detail auftreten, wie bei asymmetrischen Mechanismen an den Dachgelenken. In diesen Fällen muss grundsätzlich auch von einer asymmetrischen Lastausprägung ausgegangen werden. Dadurch ist es notwendig, einseitig wirkende Lastfälle wie Einzelbögen in variierter Richtung zu berücksichtigen.

Die Richtlinie enthält keine Vorgaben zur Gleislagestörung. Es kann jedoch sinnvoll sein, die Szenarien mit einer Gleislagestörung zu überlagern, die sich aus der projektbezogen zu erwartenden Gleisqualität ergibt. Dies verhindert insbesondere den idealen Lauf des Fahrzeugs im geraden Gleis und führt damit unter anderem zu einem realitätsnahen Fahrzeugzustand am Bogeneingang. Problematisch ist das Fehlen einheitlicher Vorgaben für die Gleislagestörung, wodurch hier oft Erfahrungswerte herangezogen werden müssen. Anhaltspunkte können die Empfehlungen der ORE [Ore77] geben.

Ein Beispiel für einen synthetischen Lastfall zeigt Bild 4.2. Bei der Synthese der Gleislage wird üblicherweise bewusst in Kauf genommen, dass Trassierungen entstehen, die in der Realität nicht anzutreffen sind, da sie betrieblich nicht sinnvoll, baulich nicht umsetzbar oder physikalisch nicht möglich sind. Beispiele sind Bögen mit Bogenlänge $l > 2\pi r$, Bogenfolgen mit überlappendem Gleis und sich kreuzendes Gleis mit geringem Höhenunterschied. Dies steht nicht im Widerspruch zur Absicht, grundlegende Parameter des untersuchten Netzes überlagert abzubilden, unterscheidet die Herangehensweise aber von der im Folgenden beschriebenen realen Gleislage.

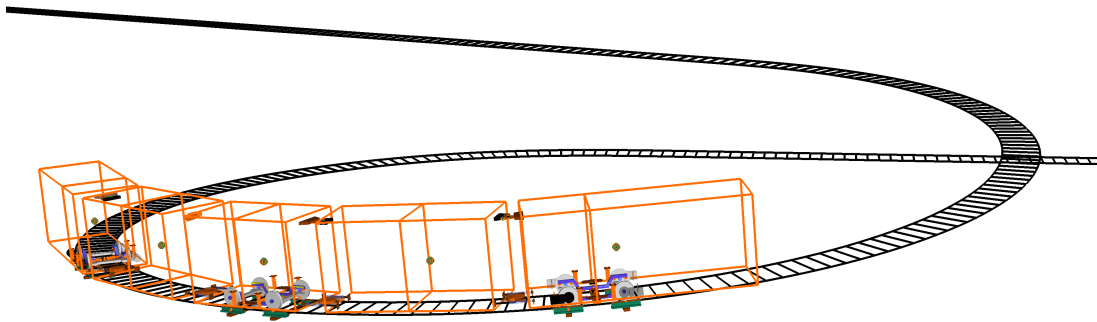


Bild 4.2: Beispiel eines synthetischen Lastfalls für Gleisverwindung durch Überlagerung von engem Bogen und starkem Gefälle

4.2 Lastfälle auf Basis realer Gleislage

Reale Gleislage bezeichnet in diesem Kontext die möglichst realitätsgetreue Nachbildung der in einem Fahrzeugprojekt tatsächlich vorzufindenden Infrastruktur. Sie kann nicht synthetisch aus einem reduzierten Parametersatz gewonnen werden, sondern Bedarf der in Abschnitt 2.4 beschriebenen Mess- und Ermittlungsverfahren. Demnach kann sie entweder direkt gemessen oder zum Beispiel aus Gleisnetzplänen abgeleitet werden. Je nach Methodik unterliegt sie unterschiedlichen Fehlern – die, wie in Abschnitt 2.4.1 gezeigt, zum Teil behoben werden können – in jedem Fall kann sie jedoch nur eine Annäherung an die realen Verhältnisse darstellen. Weiter darf der Auslegungsprozess nicht allein auf

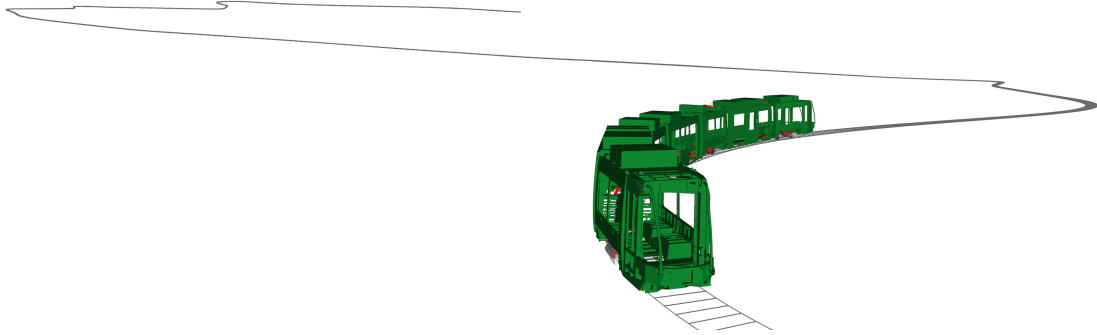


Bild 4.3: Beispiel eines Lastfalls auf Basis gemessener Gleislage (Bergstrecke, Länge etwa 6 km)

realer Gleislage beruhen, da diese im Gegensatz zu synthetischer Gleislage naturgemäß keine vom Betreiber in der Zukunft geschaffene Infrastruktur umfassen kann.

Reale Gleislage kann, wie in Abschnitt 3.2 dargestellt, in das Simulationsmodell eingebunden werden, Bild 4.3 zeigt ein Beispiel. Für den Simulationsablauf ist es problematisch, dass reale Gleislage dem Fahrzeugmodell keinen einheitlichen und neutralen Anfangszustand bieten kann. Daher ist es notwendig, der Trassierung eine Gerade vorzuschalten, die der Fahrzeuglänge zuzüglich gegebenenfalls benötigter Einschwingwege entspricht. Diesem störungsfreien Abschnitt ist ein Übergangsstück anzufügen, welches mit definierten Grenzwerten für die horizontale und vertikale Krümmungsänderung und für die Änderung der gegenseitigen Höhenlage auf die Anfangswerte der realen Gleislage inklusive ihrer Störung überleitet. Es bietet sich an, dies gleichsam am Trassierungsende durchzuführen, um ein definiertes Simulationsende und eine Rückstellung aller Lasten zu erhalten. Die Länge der hinzugefügten Wegabschnitte muss für spätere Arbeitsschritte gespeichert werden.

4.3 Sonderlastfälle

Sonderlastfälle unterscheiden sich von regulären Lastfällen durch ihr seltenes Auftreten. Aus der großen Anzahl der denkbaren, aber oft nur projektweise bedeutenden Sonderlastfälle sollen im Folgenden zwei Lastfallgruppen näher beleuchtet werden.

4.3.1 Falschfahrt an Weichen

Der Begriff Falschfahrt bezeichnet das voneinander abweichende Abzweigen/Nichtabzweigen zweier Fahrwerke eines Fahrzeugs an einer Weiche. Dies kann beispielsweise durch Schalten der Weiche unter dem Fahrzeug, durch Wechsel der Fahrzeugrichtung über einer Rückstellweiche, durch nicht in Endlage befindliche Weichenzungen und durch stark verschmutzte Rillenschienen auftreten. Der Sonderlastfall Falschfahrt tritt

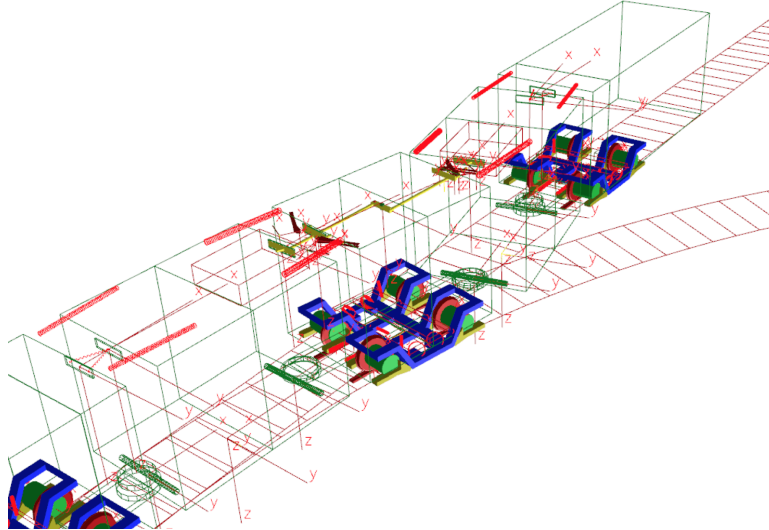


Bild 4.4: Falschfahrt an einer Weiche

daher vor allem im Straßenbahnbereich vergleichsweise häufig auf. Bei Gelenkstraßenbahnen hat er zur Folge, das Fahrwerke und Gelenke um die Hochachse stark ausdrehen und ihre Ausdrehanschläge erreichen. In der Folge steigen die Kräfte an den Anschlägen solange an, bis die entgegengerichteten Querkräfte am Rad-Schiene-Kontakt zum Entgleisen eines Fahrwerks führen. Die Höhe der maximalen Kräfte an den Ausdrehanschlägen ist stark von der Fahrzeuggeometrie und der dadurch wirkenden Hebellängen abhängig, was in [SSS10] ausführlich thematisiert und für verschiedenen Fahrzeugkonzepte analytisch berechnet wird.

Auch mit Hilfe der Mehrkörpersimulation können die auf die Struktur wirkenden Kräfte zwischen regulärer Fahrt und Entgleisungszeitpunkt ermittelt werden. Ist die Anzahl der gleichzeitig vorgebbaren Gleisstrajektorien im Simulationsprogramm auf Eins beschränkt, kann sich damit beholfen werden, eine Gleisfolge bestehend aus Gerade, 360°-Bogen und Gerade vorzugeben, und die initiale Wegposition des abweichenden Fahrwerks um $2\pi r_B$ zu erhöhen. Bild 4.4 zeigt ein Beispiel eines auf diese Weise modellierten Lastfalls. Insbesondere bei straßengebundenem Gleis kann angenommen werden, dass das Lastmaximum zum Zeitpunkt der Entgleisung erreicht wird. Lasten nach diesem Zeitpunkt können nicht ohne weiteres simuliert werden.

4.3.2 Anheben und Bergen

Übliche Bergeszenarien eines Fahrzeugs, wie das Wiedereingleisen eines einzelnen Fahrwerks, lassen sich in der MKS-Simulation im Zeitbereich nachbilden. Hierfür müssen die Anhebestellen der Wagenkästen, wie zum Beispiel Absetzstellen, Einsteckachsen und

Innenanhebestellen, als körperfeste Marker (Starrkörpermodell) und gegebenenfalls als Masterknoten (EMKS) definiert werden. Weiter kann das Hebwerkzeug durch einfache Starrkörper modelliert werden, denen über rheonome Gelenke zum inertialfesten System Wegvorgaben in y- und z-Richtung über der Zeit vorgeschrieben werden. Mit geeigneten Vorgaben können dadurch beliebige Anhebe-, Verschiebe-, und Absetzvorgänge abgebildet werden. Zwischen Hebwerkzeug und Anhebestelle sind Kraftelemente zu definieren, die (meist einseitig) die Lagersteifigkeit abbilden.

Die Modellierung des Rad-Schiene-Kontakts am einzugleisenden Fahrwerk muss das Radabheben ermöglichen oder kann gegebenenfalls entfernt werden. Die übrigen Rad-Schiene-Kontakte bleiben im Modell unberührt und ermöglichen die Längsbewegung einzelner Fahrwerke. Verlangen diese eine Fahrgeschwindigkeit größer Null, kann gegebenenfalls den rheonomen Gelenken der Hebwerkzeuge sowie dem Fahrzeugmodell eine niedrige, konstante Geschwindigkeit in x-Richtung vorgegeben werden.

Auf die gleiche Weise lassen sich Lastannahmen für das reguläre Werkstattanheben gewinnen. Bild 4.5 zeigt hierfür ein Beispielmmodell. Durch unterschiedliche Weg-Zeit-Vorgaben an den Anhebestellen können hierbei auch ohne weiteres die Auswirkungen von Ungleichlauf der Hubanlage auf die Lasten ermittelt werden.

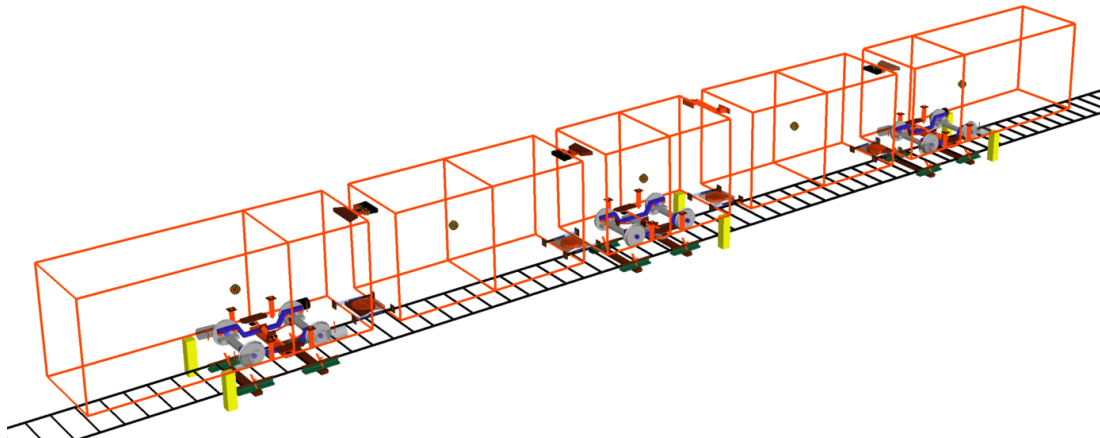


Bild 4.5: Simulationsmodell Werkstattanheben an Absetzstellen unter Berücksichtigung eines Ungleichlaufs der Hubanlage

4.4 Vorgabe der Fahrgeschwindigkeit

4.4.1 Problemstellung

In Abschnitt 3.3.2 wurden verschiedene Möglichkeiten der Geschwindigkeitsvorgabe im Simulationsmodell erörtert. Bei der Simulation von Fahrscenarien, insbesondere solcher auf Basis realer Gleislage, stellt sich immer auch die Frage nach einer wirklichkeitsge-

treuen Fahrgeschwindigkeit. In der Praxis werden für Simulationen mit Fokus auf die Längsdynamik konstante Beschleunigungen oder Antriebsmomente vorgegeben. Für Simulationen mit Fokus auf die Querdynamik werden oft konstante Geschwindigkeiten gewählt, die im simulierten Szenario (zum Beispiel einzelner Bogen, S-Bogen) zu einer festgelegten maximal zulässigen Querbeschleunigung in der Bogenbeharrung führen.

Sollen hingegen komplexe, realitätsnahe Szenarien durchfahren werden, führt die Einschränkung auf eine konstante Geschwindigkeit zu Problemen, da dann nur die auf der gesamten Trassierung durchgängig mögliche Geschwindigkeit genutzt werden kann. Insbesondere bei längeren Streckenabschnitten mit Bögen unterschiedlicher Art ist diese Herangehensweise nicht zweckmäßig. So werden etwa bei der Simulation einer Wendeschleife, die aus einer Folge von vier 90°-Bögen unterschiedlicher Radien besteht, drei Bögen mit einer Geschwindigkeit durchfahren, bei der die maximal zulässige Querbeschleunigung nicht erreicht wird. Hier ist es notwendig, Geschwindigkeitsprofile, also Geschwindigkeitswegverläufe oder Geschwindigkeitszeitverläufe, vorzugeben.

4.4.2 Einbindung gemessener Fahrgeschwindigkeiten

Dient reale Gleislage als Basis eines Lastfalls, liegt im Idealfall auch eine Fahrzeugmessung vor, bei der derselbe Streckenabschnitt befahren und die Fahrgeschwindigkeit aufgezeichnet wurde. Die Kombination realer Gleislage und realer Fahrgeschwindigkeit bildet die optimale Grundlage einer realitätsnahen Simulation. Weiter führt die Nutzung der gemessenen Fahrgeschwindigkeit dazu, dass alle anderen simulierten und gemessenen Zeitverläufe direkt miteinander verglichen werden können. Wie in Abschnitt 2.2.2 aufgezeigt, lassen sich dabei mit unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten bei der Fahrzeugmessung auch bestimmte Einflussfaktoren verstärken oder ausschließen.

Mit Hilfe der in Abschnitt 2.5.1 gezeigten Vorgehensweise kann die gemessene Fahrgeschwindigkeit der Gleislage zugeordnet und der gemeinsame Messabschnitt bestimmt werden. Anhand der so ermittelten Start- und Endzeitpunkte des gemeinsamen Gleisabschnitts lässt sich die gemessene Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit direkt auslesen und übernehmen. Wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben, sollte bei längeren Simulationsstrecken zusätzlich der beim Synchronisierungsvorgang gewonnene Weg-Zeit-Verlauf in das Modell übernommen werden.

Für den Simulationsablauf ist es weiter von Bedeutung, dass die Initialgeschwindigkeit v_0 hinterlegt wird und der zeitliche Versatz Berücksichtigung findet, falls der gemessenen Gleislage eine Anfangsgerade mit Übergangsbogen vorgeschaltet wird. Um ein definiertes Ende des Simulationslaufs zu erhalten, muss die Simulationsdauer, gegebenenfalls unter Berücksichtigung der Endgeraden, berechnet und für die Solver-Konfiguration genutzt werden.

4.4.3 Synthese realitätsnaher Geschwindigkeitsprofile

Oft liegt für ein Fahrscenario zwar die reale Trassierung, jedoch kein gemessenes Geschwindigkeitsprofil vor. Für diesen Fall ist die Synthese eines realitätsnahen Geschwindigkeitsprofils hilfreich. Die Geschwindigkeit wird durch folgende technischen Aspekte begrenzt:

- Maximale freie Querbeschleunigung $a_{q,\max}$ im (überhöhten) Bogen;
- Maximal zulässige Betriebsgeschwindigkeit v_{\max} ;
- Beschleunigungsvermögen $a_{x,\max}$;
- Bremsvermögen $a_{x,\min}$ (mit $a_{x,\min} < 0$).

Mit Hilfe dieser Werte lässt sich für eine gegebene Trassierung der horizontalen Krümmung $\kappa^h(s)$ und der Überhöhung $u(s)$ ein Geschwindigkeitsprofil $v(s)$ erzeugen, das die maximal mögliche Fahrgeschwindigkeit abbildet (die *Spitzfahrt*). Liegen Krümmung und Überhöhung zu diskreten Wegschritten s_i mit konstanter Wegschrittweite

$$\Delta s = s_i - s_{i-1} = \text{const.} \quad \text{für alle } i \in \{2, \dots, n\} \quad (4.1)$$

vor, ist die Ermittlung der an diesen n Wegschritten erlaubten Fahrgeschwindigkeit v_i beispielsweise nach folgendem Vorgehen möglich:

Die auf das Fahrzeug wirkende Querbeschleunigung a_q berechnet sich an einem Ort s_i aus der Fahrgeschwindigkeit v_i , der horizontalen Krümmung κ_i , der Überhöhung u_i und der Radaufstandsweite b nach

$$a_{q,i} = v_i^2 \cdot \kappa_i - \frac{u_i}{b} g. \quad (4.2)$$

Für eine konservative Lastermittlung muss im Zweifelsfall eine zu hohe Geschwindigkeitsannahme getroffen werden. Daher sollte im Fall einer Überhöhung des bogeninneren Gleises gegenüber dem bogenäußeren Gleis, wie sie etwa bei straßengebundenem Gleis durch Absackung auftreten kann, keine Geschwindigkeitsreduktion angesetzt werden. Dahergilt für alle $i \in \{1, \dots, n\}$ zunächst

$$v_i := \begin{cases} \sqrt{\left| \frac{1}{\kappa_i} \right| a_{q,\max} + \frac{1}{\kappa_i} \frac{u_i}{b} g}, & \text{wenn } \text{sgn}(\kappa_i) = \text{sgn}(u_i), \\ \sqrt{\left| \frac{1}{\kappa_i} \right| a_{q,\max}}, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.3)$$

Um nun zusätzlich an jedem Wegschritt die zulässige Betriebsgeschwindigkeit zu befolgen, sei diese durch

$$v_i := \min(\{v_i, v_{\max}\}) \quad \text{für alle } i \in \{1, \dots, n\} \quad (4.4)$$

limitiert.

Weiter soll nun das Beschleunigungsvermögen – also die Begrenzung der positiven Längsbeschleunigung – Berücksichtigung finden. Die (mittlere) Längsbeschleunigung zwischen zwei Wegschritten i und $i + 1$ für das bisher erzeugte Geschwindigkeitsprofil beträgt

$$a_{x,i,i+1} = \frac{v_{i+1}^2 - v_i^2}{2\Delta s}. \quad (4.5)$$

Übersteigt ein Wert $a_{x,i,i+1}$ die zulässige Beschleunigung $a_{x,\max}$, muss v_{i+1} abgesenkt werden, da keiner der bisher ermittelten Geschwindigkeitswerte – einschließlich v_i – angehoben werden darf. Der zulässige Wert für v_{i+1} beträgt folglich

$$v_{i+1} := \begin{cases} \sqrt{v_i^2 + 2a_{x,\max}\Delta s}, & \text{wenn } a_{x,i,i+1} > a_{x,\max}, \\ v_{i+1}, & \text{sonst,} \end{cases} \quad (4.6)$$

wobei die Formel für alle $i \in \{1, \dots, n-1\}$ in aufsteigender Reihenfolge anzuwenden ist.

Analog zur positiven Längsbeschleunigung ist jetzt das Bremsvermögen, die betragsmäßig größte negative Längsbeschleunigung, zu beachten. Auch hier gilt Formel 4.5 und analog zu 4.6 ist die Formel

$$v_{i-1} := \begin{cases} \sqrt{v_i^2 - 2a_{x,\min}\Delta s}, & \text{wenn } a_{x,i-1,i} < a_{x,\min}, \\ v_{i-1}, & \text{sonst,} \end{cases} \quad (4.7)$$

für alle $i \in \{2, \dots, n\}$ – nun jedoch in absteigender Reihenfolge – anzuwenden.

Es muss bedacht werden, dass das auf diese Weise ermittelte Geschwindigkeitsprofil nur für einen einzelnen Radsatz gültig ist. Die gestellten Anforderungen müssen jedoch an allen Radsätzen des Fahrzeugs erfüllt werden. Aus diesem Grund ist die Fahrzeuglänge l_{Fz} zwischen dem ersten und letzten Radsatz, gemessen als $l \in \mathbb{Z}$ Wegschritte der Länge Δs , heranzuziehen. Dann gilt, bezogen auf den führenden Radsatz,

$$v_i := \min_{j \in \{i-l, \dots, i\}} v_j \quad \text{für alle } i \in \{l+1, \dots, n\}. \quad (4.8)$$

Beinhaltet die Trassierung, wie in Abschnitt 4.2 vorgeschlagen, eine vorgeschaltete Anfangsgerade mit Übergangsbogen der gemeinsamen Länge von $a \in \mathbb{Z}$ Wegschritten, muss für diesen Abschnitt jene Geschwindigkeit

$$v_i := v_a = \text{const.} \quad \text{für alle } i \in \{1, \dots, a-1\} \quad (4.9)$$

vorgegeben werden, die am Ende des Abschnitts gilt. Als Beispiel zeigt Bild 4.6 ein auf diese Weise erzeugtes Geschwindigkeitsprofil.



Bild 4.6: Grafikausgabe des Programms zur Synthese eines Geschwindigkeitsprofils (oben) für vorgegebene Gleiskrümmungs- und Überhöhungsverläufe (unten)

Für die Plausibilitätsprüfung der so erzeugten Geschwindigkeitsprofile kann auf einen großen Datenbestand vergangener Messungen zugegriffen werden. Ein Beispiel für den Vergleich einer gemessenen und einer synthetisch erzeugten Fahrgeschwindigkeit zeigt Bild 4.7. Bei geeigneter Parametrierung ist die erzeugte Geschwindigkeit stets gleich oder größer der in der Realität auftretenden Werte. Abweichungen nach unten ergeben sich in erster Linie aus betrieblichen Gegebenheiten, insbesondere aus

- (1) Betriebsbedingtem Halten (z.B. an Haltestellen),
- (2) Verkehrsbedingtem Halten (z.B. an Signalanlagen),
- (3) Langsamfahrstellen (z.B. durch Gleisschäden),
- (4) Geschwindigkeitsbegrenzungen (z.B. auf straßengebundenem Gleis der StVO),
- (5) Verkehrsbedingtem Langsamfahren (z.B. durch Stau).

Dem Ziel, eine Strecke mit der anzunehmenden Höchstgeschwindigkeit zu befahren, um zu einer tendenziell konservativen Lasteinschätzung zu kommen, steht das Fehlen dieser Geschwindigkeitsabweichungen nicht im Weg. Mit Blick auf eine möglichst realitätsnahe Abbildung der im Betrieb auftretenden Lasten kommt jedoch zumindest die Berücksichtigung regelmäßig genutzter Haltepunkte in Frage. Diese können dabei bei geringem Streckenumfang von Hand gesetzt werden. Werden Gleisdaten ausschließlich oder zusätzlich aus Gleislageplänen gewonnen, ist es auch denkbar, die Positionen von Haltestellen automatisiert einzubeziehen.

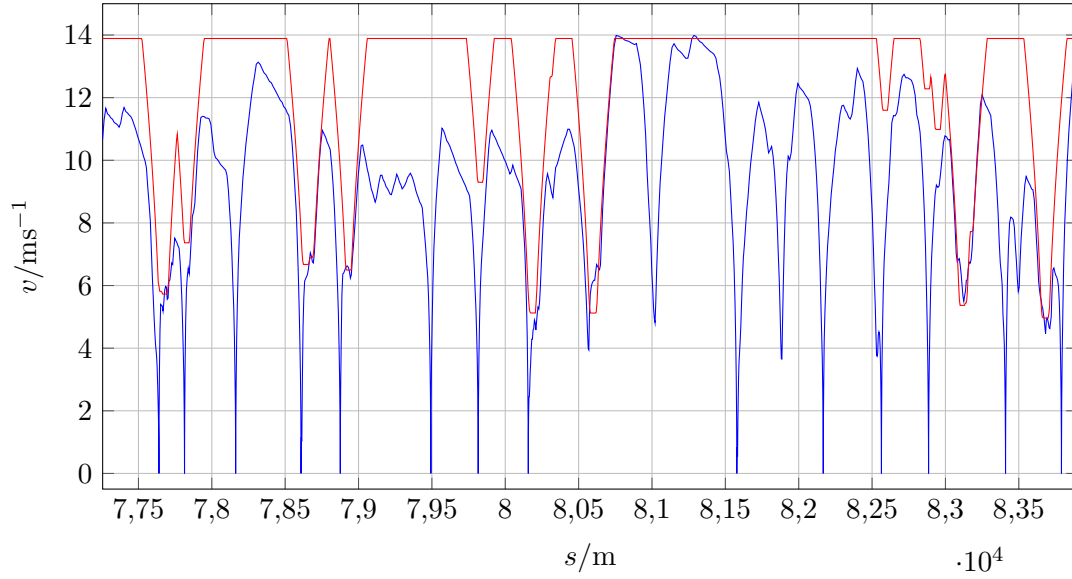


Bild 4.7: Generiertes Geschwindigkeitsprofil (rot) für eine näherungsweise bekannte Gleiskrümmung im Vergleich mit der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit (blau)

Um das ermittelte Geschwindigkeitsprofil in das Simulationsmodell einbinden zu können ist – wie in Abschnitt 3.3.2 erläutert – eine Beschreibung von Sollgeschwindigkeit und zurückgelegtem Weg in Abhängigkeit der Zeit notwendig. Dies geschieht zweckmäßigerweise zu äquidistanten Zeitschritten

$$t_k^* = (k - 1) \cdot \Delta t^* \quad \text{für alle } k \in \{1, \dots, m\}, \quad (4.10)$$

wobei für die Ermittlung von s_k^* und v_k^* aus dem eingangs gegebenen zurückgelegten Weg s_i und aus v_i zunächst die zugehörigen – selbst nicht-äquidistanten – Zeitschritte t_i ermittelt werden müssen.

Unter Annahme und Berücksichtigung dessen, dass sich der führende Radsatz des Fahrzeugs zum Start der Simulation, dem Zeitpunkt $t = 0$, bereits an einem Ort entlang des Gleises befindet, in der Regel bei $s = l_{\text{Fz}}$, berechnen sich die Zeitschritte nach

$$t_i := \begin{cases} 0 - \frac{l_{\text{Fz}}}{v_a} & \text{für } i = 1, \\ t_{i-1} + \frac{2\Delta s}{v_{i-1} + v_i} & \text{für alle } i \in \{2, \dots, n\}. \end{cases} \quad (4.11)$$

Der führende Radsatz befindet sich zusammenfassend zu jedem Zeitpunkt t_i mit der Geschwindigkeit v_i am Ort s_i . Nun lässt sich beispielsweise mit linearer Interpolation

die gesuchte zeitabhängige Geschwindigkeit

$$v_k^* = v_j + \frac{v_{j+1} - v_j}{t_{j+1} - t_j} (t_k^* - t_j) \quad \text{mit } t_j \leq t_k^* < t_{j+1} \text{ für alle } k \in \{1, \dots, m\} \quad (4.12)$$

und analog dazu der gesuchte zeitabhängige Weg

$$s_k^* = s_j + \frac{\Delta s}{t_{j+1} - t_j} (t_k^* - t_j) \quad \text{mit } t_j \leq t_k^* < t_{j+1} \text{ für alle } k \in \{1, \dots, m\} \quad (4.13)$$

berechnen.

4.5 Simulationsprozess

Der Simulationsablauf für die Ermittlung von Schnittlasten soll an dieser Stelle nicht starr festgelegt werden – vielmehr sollen mögliche Prozessketten vorgestellt werden, um flexibel auf unterschiedliche Gegebenheiten und Anforderungen reagieren zu können. Die verschiedenen Vorgehensweisen sollen zunächst diskutiert werden, um sie im Anschluss zu verallgemeinern und den Gesamtvorgang zu automatisieren.

4.5.1 Prozessketten

Mit Hilfe der in dieser Arbeit aufgezeigten Mittel sind verschiedene Prozessketten denkbar, die sich in ihren Eingangsdaten und deren Nutzung unterscheiden. Bild 4.8 zeigt vereinfacht eine mögliche Prozesskette, um auf Basis von n Gleisabschnittsmessungen n Lastfälle aufzustellen. Für jeden Lastfall wird nach Abschnitt 4.4.2 ein Geschwindigkeitsprofil aus einer Fahrtmessung extrahiert. Hierfür ist zuvor die Synchronisierung beider Datensätze nach Abschnitt 2.5.1 notwendig. Aus diesem zusammengeführten Datensatz können Trassierung, Gleisstörung und Fahrgeschwindigkeitsprofil für den Lastfall bereitgestellt werden.

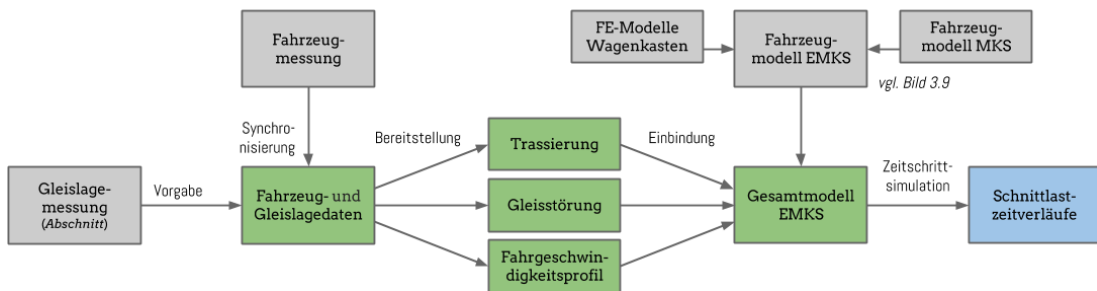
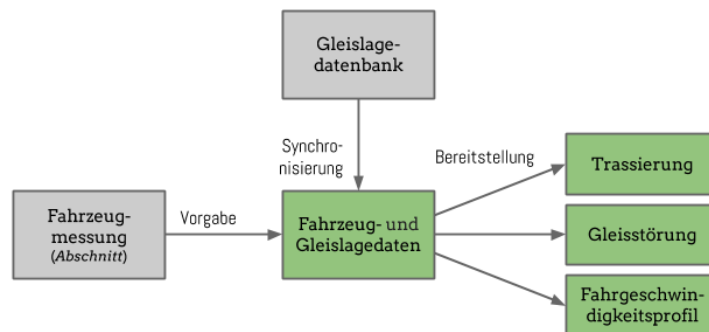
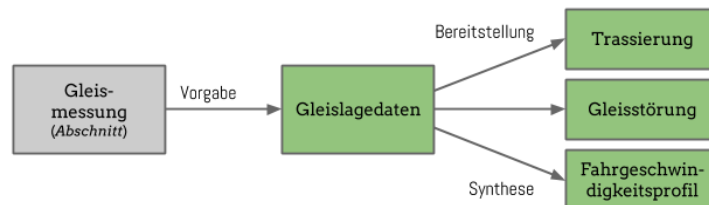


Bild 4.8: Vereinfachte Prozesskette zur Gewinnung der Schnittlastzeitverläufe unter Nutzung von Gleis- und Fahrzeugmessung

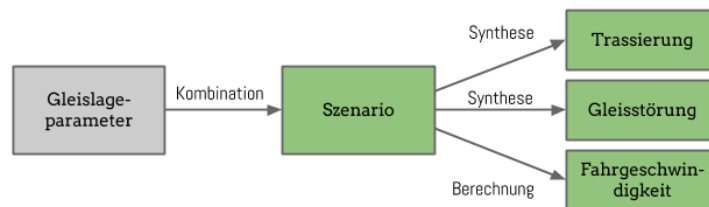
Der Trassierung ist dabei eine Anfangsgerade nach Abschnitt 4.2 voranzustellen. Gleislagestörung sowie Fahrgeschwindigkeitsprofil sind darauf anzupassen. Alle drei Datensätze können nahtlos in das EMKS-Gesamtfahrzeugmodell nach Abschnitt 3.6 eingebunden werden, wo sie jenes Nullgleis und jene konstante Geschwindigkeitsvorgabe ersetzen, die zum Einstellen des Fahrzeugs auf seine nominelle Lage nach Abschnitt 3.3.3 gedient haben. Anhand der Vorgabewerte ist es nun möglich, die notwendige Simulationszeit zu bestimmen und das Gesamtmodell über diese Simulationszeit der Zeitschritt-simulation zu unterziehen. Als Ergebnis werden – wie in Abschnitt 3.6.2 beschrieben – die Schnittlastzeitverläufe der Wagenkästen ermittelt.



- (a) Alternativer Prozessbeginn für Bild 4.8, wenn die Lastfalldefinition über einzelne Fahrzeugmessabschnitte getroffen und die Gleislage aus einer Datenbank zugeordnet wird



- (b) Alternativer Prozessbeginn für Bild 4.8, wenn die Lastfalldefinition über einzelne Gleismessungen getroffen wird, jedoch keine Fahrzeugmessung vorliegt



- (c) Alternativer Prozessbeginn für Bild 4.8, wenn die Lastfalldefinition ausschließlich über die Kombination von Gleislageparametern getroffen wird

Bild 4.9: Alternative Prozessketten

Neben dieser Vorgehensweise sind jedoch auch andere Simulationsabfolgen realisierbar. Ohne wesentliche Änderungen an der Prozesskette können so statt der Gleismessabschnitte auch n Fahrzeugmessabschnitte als Grundlage für die Lastfallsimulation dienen. Dies zeigt Bild 4.9a. Die Gleislage zu diesen Fahrzeugmessabschnitten ist beispielsweise einer Gleislagedatenbank zu entnehmen, wie sie in Abschnitt 2.4.2 dargelegt ist. Hierfür ist die Synchronisierung der Datensätze nach Abschnitt 2.5 notwendig.

Aber nicht immer stehen Fahrzeug- und Gleismessung gleichermaßen zur Verfügung. Fehlt die Fahrzeugmessung, etwa weil bei einer Fahrzeugneuentwicklung für ein bestimmtes Gleisnetz keine vergleichbaren Bestandsfahrzeuge vorhanden sind, so ist das Fahrgeschwindigkeitsprofil rechnerisch zu erzeugen. Dies wurde in Abschnitt 4.4.3 hergeleitet. Bild 4.9b zeigt die resultierende Prozesskette. Fehlen sowohl Fahrzeug- als auch Gleismessung, beispielsweise weil mögliche zukünftige Strecken anhand einer Trassierungsrichtlinie betrachtet werden sollen, so ist auch die Gleislage synthetisch zu erzeugen, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben. Die sich ergebende Prozesskette ist in Bild 4.9c dargestellt.

4.5.2 Automatisierung

Wie zu Beginn dieses Kapitels diskutiert, lassen sich aufgrund der Komplexität und Nichlinearität des betrachteten Gesamtsystems a priori keine zuverlässigen Entscheidungen darüber treffen, welche realen Lastfälle als Auslegungslastfälle vernachlässigbar sind. Als eines von sehr vielen Beispielen diene hier, dass trotz geringem Lasteintrag bei Bogenfahrt und geringem Lasteintrag bei Steigungsfahrt sehr hohe Torsionslasten bei der Überlagerung von Bogen und Steigung auftreten können.

Als Konsequenz ist es für die zuverlässige Lastermittlung unabdingbar, möglichst viele Lastfälle einzubeziehen. Gleichzeitig gibt es zahlreiche mit Unsicherheiten behaftete Fahrzeugparameter mit hohem Einfluss auf die resultierenden Lasten, die es ihrerseits erforderlich machen, eine Vielzahl an Modellvarianten zu prüfen. In der Folge ist ein hoher Automatisierungsgrad der Berechnung unverzichtbar, um durch ein großes Berechnungsvolumen zu vollständigen Lastannahmen für die Festigkeitsauslegung gelangen zu können.

Die Automatisierung ist hierbei stets als Zielkonflikt zu begreifen, da die automatisierte Berechnung auf der einen Seite viel Arbeitszeit sparen kann, auf der anderen Seite aber auch Aufwand für Erstellung und Pflege der Automatisierungsroutinen entsteht [Mun13]. Ein Berechnungsprozess ist dabei umso besser automatisierbar, je weniger Ausnahmen er enthält. Die Sonderbehandlung von Spezialfällen verursacht erheblichen Zusatzaufwand und führt durch die höhere Komplexität prinzipiell auch zu einer geringeren Ergebnissicherheit.

Bereits mit den oben genannten vier Prozessketten gibt es zahlreiche Varianten, doch sie sind noch nicht erschöpfend. So kann es in einem Projekt erforderlich sein, dieselbe Trassierung mit unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten zu untersuchen, während in einem anderen eine Modellvariante mit unterschiedlichen Beladungszuständen Berücksichtigung finden muss. Es soll zunächst gesammelt werden, welche für die Automatisierung maßgeblichen variablen Entitäten die Lastfallsimulation aufweisen kann:

Fahrzeugvarianten Von einem Fahrzeugtyp können verschiedene Varianten bestehen, die sich zum Beispiel in ihrer Wagenkastenanzahl oder in ihrer Ausführung als Ein- oder Zweirichter unterscheiden.

Fahrzeugmodelle Varianten des Fahrzeugmodells entstehen im Wesentlichen durch die Modellverfeinerung während der Projektlaufzeit. Sie müssen oft gleichzeitig betrachtet werden können, damit Zusammenhänge zwischen Modell- und Ergebnisänderungen transparent bleiben.

Modellierungsarten Ein ansonsten identisches Fahrzeugmodell kann variabel als reines MKS (mit starren Wagenkästen) oder EMKS (mit elastischen Wagenkästen) genutzt werden.

Fahrzeugauslegung Auslegungsvarianten unterscheiden sich beispielsweise hinsichtlich Sekundärfedersteifigkeiten, Gelenkanordnung und Wagenteillängen. Im Laufe eines Fahrzeugprojekts müssen in der Regel verschiedene Fahrzeugauslegungen untersucht und verglichen werden.

Trassierungen Eine Trassierung kann eine vorkonfigurierte synthetische oder gemessene Gleislage beinhalten. In beiden Fällen muss eine Vielzahl an Trassierungen betrachtet werden.

Gleisstörungen Unterschiedliche Gleisstörungen können insbesondere bei synthetischen Trassierungen angesetzt werden, um unterschiedliche Gleislagequalitäten und Verschleißzustände abzubilden.

Lastverteilungen Die Untersuchung verschiedener Lastverteilungen kann erforderlich sein, wenn verschiedene Fahrzeugauslegungen und Innenraumkonfigurationen betrachtet werden oder wenn die Lastverteilung projektbezogen nach mehreren, differierenden Regelwerken aufgestellt werden muss.

Beladungszustände Der Beladungszustand kann zum Beispiel die Varianten leer, 2/3-beladen und maximal beladen aufweisen.

Fahrzeugmessungen Liegen der Simulation Fahrzeugmessungen zu Grunde, können mehrere Überfahrten einer Trassierung vorliegen. Liegen gezielt unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten zu Grunde, ist die Simulation der entsprechenden Varianten von Bedeutung.

Fahrgeschwindigkeiten Die vorzugebende Fahrgeschwindigkeit resultiert aus Betreiberanforderungen und Richtlinien in Abhängigkeit der Trassierung. Es kann erforderlich sein, eine Variation der Fahrgeschwindigkeitsvorgabe zu betrachten.

Die Lastfallerstellung ist nun als Lastfallmatrix möglich, zum Beispiel Trassierungen über Fahrgeschwindigkeiten oder Trassierungen über Gleisstörungen. Auch für das Fahrzeugmodell kann eine Variantenmatrix erstellt werden, zum Beispiel Modellierungsarten über Lastverteilung. Wird nun eine lediglich zweidimensionale Modellmatrix mit einer lediglich zweidimensionalen Lastfallmatrix kombiniert, entsteht bereits eine vierdimensionale Simulationsmatrix.

Diese Mehrdimensionalität stellt ein Problem für die Simulation dar, da die notwendigen Simulationsläufe exponentiell mit der Dimension steigen. Daher können entweder nur einzelne Einträge der Simulationsmatrix berücksichtigt werden – in der Folge ist die Ergebnismatrix entsprechend dünn besetzt und schwer auswertbar (*Fluch der Dimensionalität* [Bel61]) – oder aber alle Einträge werden berücksichtigt, woraus hohe Rechenzeiten und mitunter auch widersprüchliche Modell- und Lastfallkombinationen resultieren. Zur Vereinfachung werden daher folgende Einschränkungen getroffen:

Fahrzeugprojekt Die Abgrenzung des Fahrzeugprojekts fällt oft – aber nicht zwingend – mit der jeweiligen betriebswirtschaftlichen Projektabgrenzung zusammen. Es besteht aus einem Fahrzeug mit einer festen Anzahl an Wagenkästen und einer festen Menge an *Schnittknoten*. Dies ist in der Regel gegeben, in Ausnahmefällen müssen mehrere Fahrzeugprojekte separat angelegt oder Platzhalter-Elemente für Wagenkästen und Schnittknoten mitgeführt werden. Ein Fahrzeugprojekt umfasst mindestens ein Fahrzeugmodell, in der Regel jedoch eine Vielzahl an *Modellvarianten* des Fahrzeugs. Weiter umfasst es alle *Lastfälle*, die für das jeweilige Fahrzeugprojekt relevant sind. Es sei festgelegt, dass die Automatisierung stets nur ein einzelnes Fahrzeugprojekt umfasse.

Modellvarianten Eine Modellvariante ist ein rechenfähiges MKS- oder EMKS-Modell eines Fahrzeugs, dem ein vollständiger Null-Lastfall hinterlegt ist. Es besitzt lediglich einen Modellpfad und einen Modellnamen. Da Modellvarianten im wesentlichen von Hand erstellt werden, sind beliebige Variationen möglich. Alle lastfallabhängigen Eigenschaften des Modells müssen sich auf den Null-Lastfall beziehen, indem sie die Zeichenkette seiner Bezeichnung enthalten. Die Modellmatrix

sei damit eindimensional. Erfahrungsgemäß besteht eine einstellige oder niedrig zweistellige Anzahl an Modellvarianten.

Lastfälle Ein Lastfall besitzt eine eindeutige Bezeichnung, eine *Trassierung*, eine *Gleisstörung* und eine *Fahrgeschwindigkeit*. Auch die Lastfallmatrix sei damit eindimensional. Erfahrungsgemäß besteht eine dreistellige Anzahl an Lastfällen.

Weitere Eigenschaften, die nicht oder nur in sehr geringem Umfang variiert werden, wie zum Beispiel der Beladungszustand, müssen einer Modellvariante oder einem Lastfall zugeordnet werden, um die Dimension der Simulationsmatrix (Zwei) nicht zu erhöhen. Wenn im Einzelfall erforderlich, kann eine komplexere, mehrdimensionale Erstellung von Modellvarianten vorgeschaltet und eine entsprechende Auswertung nachgeschaltet werden. Entscheidend ist, dass der zentrale Simulationsprozess eine universell anwendbare, einfache und stabile Stapelverarbeitung mit konstanter Dimension ermöglicht.

4.5.3 Praktische Umsetzung

Setzt man die vorhergehenden, für die Automatisierung getroffenen Entscheidungen um, ergibt sich ein Stapelverarbeitungsprozess für die Lastfallsimulation nach Bild 4.10. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde dieser praktisch mit Hilfe der Programmierumgebung Matlab realisiert. Alle n zu berücksichtigenden Lastfälle eines Fahrzeugprojekts werden in einer einheitlichen Datenstruktur manuell definiert. Anhand dieser Definitionen führen Teilprogramme

- zum Einlesen von Messdaten aus Dateiformaten verschiedener Hersteller (*.tdms, *.dwh, *.dat, *.r32 und *.r64),
- zum Einlesen von Gleisnetzplänen und Aufbau einer Gleisdatenbank,
- zur Synchronisierung und Abschnittsbildung von Fahrzeug- und Gleismessungen,
- zur Gradientenkorrektur gemessener Gleislagedaten mit Hilfe von GPS-Daten und automatischer Höhenabfrage anderer Quellen,
- zum Erzeugen von Geschwindigkeitsprofilen zu einer gegebenen Trassierung,
- zum Schreiben des Soll-Geschwindigkeitszeitverlaufs und Soll-Wegzeitverlaufs als *Simpack-Input-Function Set* (*.if2),
- zum Erstellen kartografischer Simpack-Trassierungsdateien (*.trc),
- zur Berechnung eines Soll-Geschwindigkeitsverlaufs für eine gegebene Trassierung,
- zum Erzeugen von Simpack *Input Parameter*-Dateien (*.ip) mit Informationen zur initialen Fahrgeschwindigkeit und der Simulationszeit

eine automatische Lastfallerstellung durch. Die resultierenden Dateien legen die Teilprogramme direkt in der jeweiligen Simpack-Datenbankstruktur ab. Genau alle lastfallabhängigen Parameter und Dateien enthalten in ihrer Bezeichnung auch die exakte

Bezeichnung des jeweiligen Lastfalls. Um diese Lastfälle in der Simulation zu nutzen, wird für alle für das Fahrzeugprojekt vorhandenen m Modellvarianten folgendes Teilprogramm ausgeführt:

- Kopieren des Grundmodells, Anpassung der Trassierung, der Gleisstörung, der Soll-Geschwindigkeits- und Soll-Wegzeitverläufe, der Ausgangsgeschwindigkeit, der Simulationszeit sowie aller weiteren Lastfallparameter an das zu simulierende Szenario.

Dies erfolgt konfigurationsfrei durch konsequentes Ersetzen der Zeichenkette der Lastfallbezeichnung in den Modelldateien. Es entstehen $m \times n$ Einzelmodelle, deren Modellinformationen wie Pfad und Modellnamen an Teilprogramme der Simulationssteuerung

- zum Abfragen mehrerer Softwarelizenz-Server und Ermitteln freier Lizenzen der modellabhängig benötigten Lizenzarten,
- zur Abfrage der Anzahl laufender Rechnungen und verfügbarer Prozessorkerne,
- zum Erstellen und Ausführen von Simpack-Script-Dateien zum Starten einzelner Berechnungsläufe,
- zur Prüfung des Berechnungsstatus anhand der Dateien `*.izu` und `*.lock` sowie
- zur Überwachung der Simulationsläufe auf Abbruch oder Beendigung

übergeben werden. Die Auswertung beginnt automatisch, sobald erste Ergebnisdateien vorliegen. Hierfür werden Teilprogramme

- zum direkten Einlesen der binären Simpack-Ergebnisdateien (`*.sbr`) mit Prüfung der Inhalte auf Vollständigkeit und Plausibilität,
- zur Erstellung von Einzelbildern der Simulation mit Hilfe des Simpack Postprocessors und zur Erstellung von Videosequenzen aus diesen Einzelbildern,
- zur Erstellung von Ergebnisgrafiken (`*.png`) und Ergebnistabellen (`*.xlsx`) und
- zur Erstellung von Ergebnisdokumenten (`*.docx`)

ausgeführt.

Es liegt in der Natur ingenieurtechnischer Berechnungsaufgaben, dass sie nicht in einem Berechnungslauf abgeschlossen werden können, da die Berechnungsergebnisse selten rückwirkungsfrei auf die Eingangsgrößen sind. Im vorliegenden Fall muss davon ausgegangen werden, dass die Berechnungsergebnisse ein Optimierungspotenzial des Fahrzeugs aufzeigen. Dies hat in der Regel die Ableitung zusätzlicher Modellvarianten zur Folge, um unterschiedliche, verbesserte Auslegungsoptionen zu prüfen. Weiter können im Laufe eines Fahrzeugprojekts einzelne Lastfälle entfallen oder ergänzt werden, Modellparameter aktualisiert und Modellierungsfehler korrigiert werden. Der automatisierte Berechnungs- und Auswertungsprozess muss darauf ausgelegt sein, Änderungen

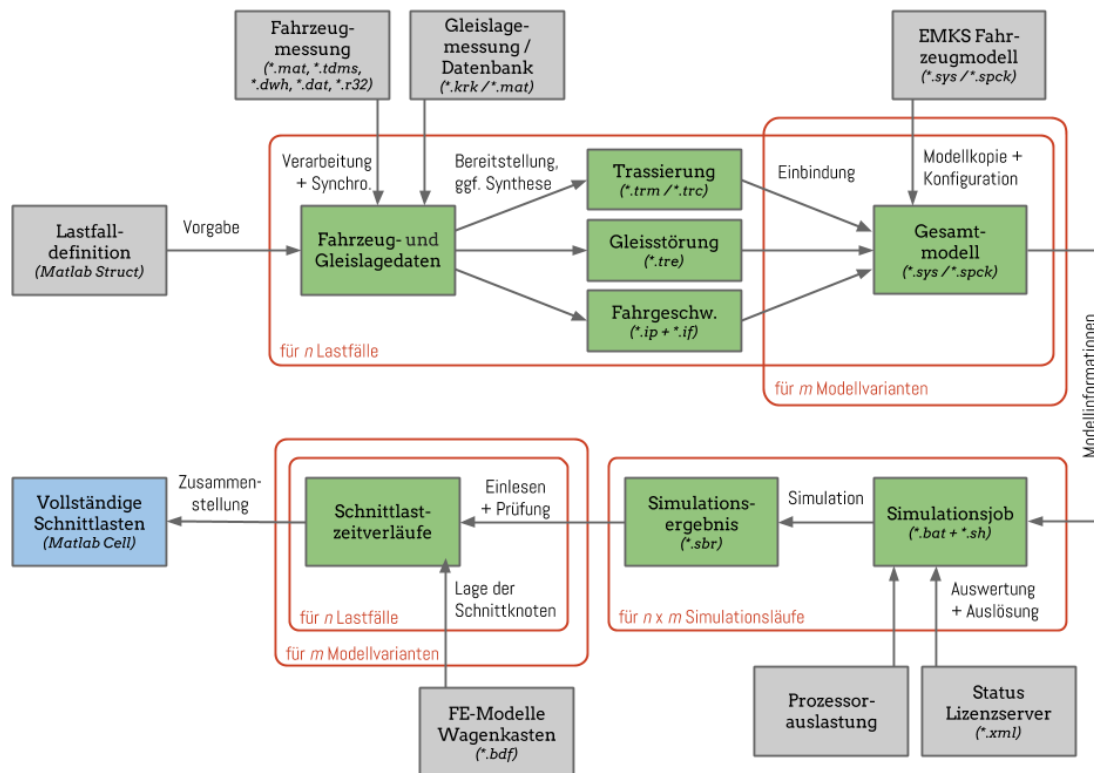


Bild 4.10: Vereinfachte Darstellung des vollständig automatisierten Gesamtprozesses (Datenformate in Klammern)

dieser Art zu ermöglichen, ohne eine vollständige Neuberechnung zu erfordern, da die Berechnungszeiten sonst im Laufe eines Fahrzeugprojekts steigen, während die für die Berechnung verfügbare Zeit erwartungsgemäß sinkt.

Um dies zu erreichen sind Ansätze ähnlich der in Kapitel 2 zur Auswertung von Langzeitmessung vorgestellten Herangehensweisen geeignet. Diese implizieren, dass die Berechnungs- und Auswertungsroutinen auf Durchgängigkeit ausgelegt sind – im Idealfall nun also die gesamte, konfigurierte Prozesskette mit einem einzelnen Funktionsaufruf ausgeführt werden kann. Es erfordert jedoch auch, dass alle dann ausgeführten Teilprogramme so aufgebaut sind, dass bei wiederholten Anfragen die bereits vorhandenen Ausgabewerte genutzt werden.

Dies kann zum Einen durch die in Abschnitt 2.3.3 eingeführte Nutzung eines unsortierten, aber konsistenten *Cache* erreicht werden. Zum Anderen können dort, wo auf das Format von Zwischenergebnissen kein direkter Einfluss genommen werden kann, da Drittprogramme zum Einsatz kommen, vergleichbare Effekte mit geeigneten Abfragefolgen erreicht werden. Als Beispiel zeigt Bild 4.11 die Verarbeitungskette im Unterprogramm des Solveraufrufs, der als Stapelverarbeitung für alle Gesamtmodelle aufgerufen wird. Das Hauptprogramm kann diesen Stapelverarbeitungsprozess ungeachtet

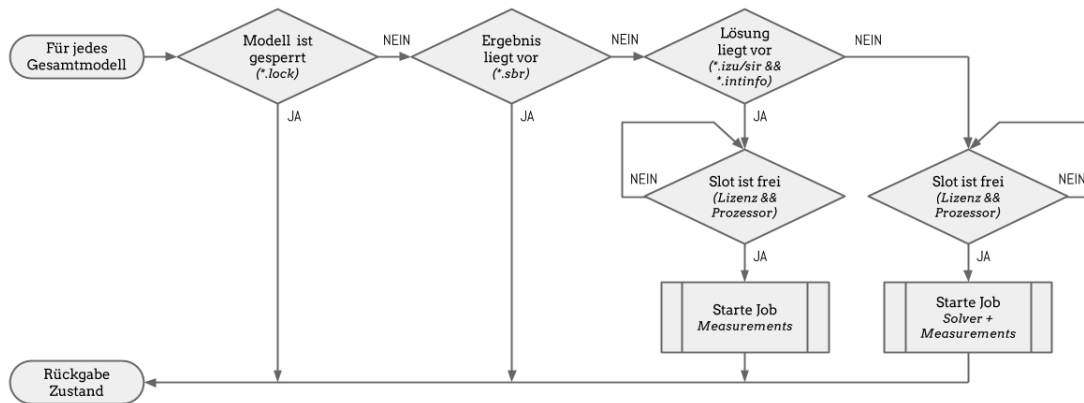


Bild 4.11: Entscheidungsbaum für die Stapelverarbeitung der Simulationsläufe in Simpack

des Berechnungsstands aufrufen, dieser sorgt selbstständig dafür, dass nur notwendige Rechnungen ausgelöst und dass unterbrochene Rechnungen zu Ende geführt werden. Wird die Berechnung um einzelne Modellvarianten und Lastfälle ergänzt, muss so keine Teilberechnung eingerichtet und durchgeführt werden. Ist eine Neuberechnung einzelner Gesamtmodelle erforderlich, zum Beispiel durch manuelle Modellanpassungen, genügt das Löschen der entsprechenden Ergebnisdateien.

Um das von Simpack als sbr-Datei (*Simpack Binary Result*) geschriebene Ergebnis direkt in Matlab einlesen zu können, ist die Analyse und Rückwärtsentwicklung des Datenformats notwendig, da vom Hersteller keine Spezifikation zur Verfügung gestellt wird. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit erfolgt. Auffällig ist die hohe Effizienz des Dateiformats durch integrierte Kompressionsverfahren. Auch dadurch ist das direkte Einlesen der Ergebnisdateien wesentlich schneller als der Standardweg, der eine Umwandlung in ein ASCII-Format vorsieht, das von Matlab wieder in Binärwerte gewandelt wird. Noch wichtiger ist angesichts der Datenmenge jedoch die Vermeidung redundanter und potenziell inkonsistenter Ergebnisdateien.

Nach dem Einlesen der Ergebnisse können diese anhand der vorliegenden Sollvorgaben, zum Beispiel Wegstrecke, Simulationszeit und Fahrgeschwindigkeit, einem automatisierten Vollständigkeits- und Plausibilitätscheck unterzogen werden. Am Ende der vorgestellten Simulationskette liegen so die Schnittlastzeitverläufe für ein gesamtes Fahrzeugprojekt – das heißt für alle Schnittknoten für alle Modellvarianten für alle Lastfälle – im Arbeitsspeicher vor und stehen für die Auswertung zur Verfügung. Ein Vorteil des gezeigten Verfahrens ist, dass sich die Simulationsergebnisse dort an der Seite sämtlicher Eingangsdaten befinden, also zum Beispiel auch zeit- und wegsynchron zu den zugrundeliegenden Fahrzeug- und Gleismessdaten. Für die Auswertung kann somit ganzheitlich auf die Daten aus Messung und Simulation zugegriffen werden.

5 Auswertungsmethoden zur Lastgewinnung und zur Festigkeitsbewertung

In den zurückliegenden Kapiteln wurde vorgestellt, wie aus Messung und Simulation Lastzeitreihen und eine Vielzahl weiterer Größen gewonnen werden. In diesem Kapitel wird gezeigt, welche Auswertungsmethoden sich auf diese Zeitreihen anwenden und welche Rückschlüsse für die Fahrzeugauslegung sich damit ziehen lassen.

5.1 Gewinnung von Auslegungslasten aus den Schnittlastzeitreihen

Zum Teil aus der Messung, grundsätzlich aber aus der Simulation, stehen für jeden Wagenkasten je 6 Schnittlastzeitreihen an n Schnittknoten zur Verfügung. Dies seien die Schnittkräfte $F_{i,x}$, $F_{i,y}$, $F_{i,z}$ und die Schnittmomente $M_{i,x}$, $M_{i,y}$, $M_{i,z}$ an den Schnittknoten der Lage $r_{i,x}$, $r_{i,y}$, $r_{i,z}$ im körperfesten Koordinatensystem des Wagenkastens, mit $i \in \{1, \dots, n\}$. Das Set der zu einem einzelnen Zeitpunkt auf den Wagenkasten wirkenden $6n$ Lasten kann als Lastvektor bezeichnet werden. Es ist von besonderer Bedeutung, dass im Regelfall kein Lastvektor auftritt, der die jeweiligen Maximalwerte enthält, da diese nicht zum selben Zeitpunkt auftreten. Um jene Lastvektoren zu bestimmen, die eine hohe Beanspruchung des Wagenkastens bewirken, ist daher eine Bewertung der Lastvektoren erforderlich.

5.1.1 Bewertungsgrößen zur Auswahl der zu betrachtenden Zeitpunkte

Für den Dauerfestigkeitsnachweis ist für jeden Punkt der Wagenkastenstruktur – insbesondere an vorhandenen Kerb- und Fügestellen – die höchste Vergleichsspannungsamplitude zu ermitteln. Diese setzt sich aus einer Unterspannung und einer Oberspannung zusammen, die in der Realität wie in der Simulation zu unterschiedlichen Zeitpunkten unter Einwirkung unterschiedlicher Lastvektoren auftreten. Aus prinzipiell beliebig vielen Zeitpunkten, zu denen die Lastvektoren bei der Messung oder Simulation registriert

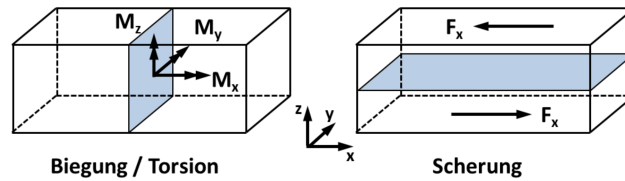


Bild 5.1: In der Neuausgabe der VDV-Richtlinie 152[Vdv16] vorgeschlagenes Schnittebenenverfahren (Originalabbildung)

werden, sind daher zunächst jene Zeitpunkte auszuwählen, zu denen die Unterspannung oder die Oberspannung erwartungsgemäß auftreten kann.

In der Praxis eingesetzt und im Entwurf der neuen VDV-Richtlinie 152 [Vdv16] vorgeschlagen wird hierfür ein pragmatisches Schnittebenenverfahren, wie in Bild 5.1 gezeigt. Auf Erfahrungswerten beruhend, werden bei diesem Verfahren die größten Beanspruchungen an allen relevanten Punkten der Wagenkastenstruktur zu jenen acht Zeitpunkten erwartet, wenn, über alle Lastfälle betrachtet,

- (1) Minimum und Maximum der Torsion um die Längsachse,
- (2) Minimum und Maximum der Scherkräfte in Längsrichtung,
- (3) Minimum und Maximum der Biegung um die Querachse oder
- (4) Minimum und Maximum des Wendens um die Hochachse

erreicht werden. Die Lage der Schnittebene und Spezifika zur Lastbilanzierung werden in der Richtlinie nicht vorgegeben. Die Herangehensweise führt in der Praxis trotz der großen Komplexion auf nur 8 Lastvektoren zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Sie ist stark angelehnt an die gebräuchliche Fahrzeugmodellierung der Wagenkästen mit Hilfe zweigeteilter Starrkörper, wie in Abschnitt 3.5.1 dargestellt. Hier lassen sich die an der Ersatzfedersteifigkeit entstehenden Torsionskräfte direkt ablesen sowie jene Zwangskräfte ermitteln, die an den gesperrten Gelenkfreiheitsgraden der Horizontal- und Vertikalbiegung auftreten, und näherungsweise der Biegung um die Querachse und dem Wenden um die Hochachse entsprechen.

Werden in der Simulation elastische Wagenkästen genutzt, wie in Abschnitt 3.5.3 erläutert, fallen diese Bewertungsgrößen zusammen mit Gelenk und Ersatzfeder weg – das vorgeschlagene Vorgehen ist dann nicht mehr ohne weiteres möglich. Beruhend auf dem selben Grundgedanken soll daher im Folgenden ein verallgemeinerter Ansatz beschrieben werden.

5.1.2 Bestimmung der Bewertungsgrößen anhand der Schnittlasten

Zunächst einmal scheint die Auswertung zu jenen Zeitpunkten aus t_k relevant, an denen die Schnittlasten zu einer hohen Gesamtlast auf den Wagenkasten führen. Diese

Summe der Schnittlasten ist im Allgemeinen ungleich Null und entspricht den auf den Wagenkasten wirkenden Trägheitslasten. Entsprechend beschreibt die Kräftebilanz

$$m^{\text{WK}} \ddot{x}_k = \underbrace{\sum_{i=1}^n F_{i,x,k}}_{E_{1,1,k}} \quad (5.1)$$

die zur Längsbeschleunigung des Wagenkastens führende Längskraft,

$$m^{\text{WK}} \ddot{y}_k = \underbrace{\sum_{i=1}^n F_{i,y,k}}_{E_{1,2,k}} \quad (5.2)$$

die zur Querbewegung führende Querkraft und

$$m^{\text{WK}} \ddot{z}_k = \underbrace{\sum_{i=1}^n F_{i,z,k}}_{E_{1,3,k}} \quad (5.3)$$

die Vertikalkraft durch die Vertikalbeschleunigung, insbesondere der Erdbeschleunigung. Weiter lassen sich durch die Momentenbilanz

$$I_{xx}^{\text{WK}} \ddot{\alpha}_k = \underbrace{\sum_n (M_{n,x} + r_{n,y} F_{n,z} - r_{n,z} F_{n,y})}_{E_{1,4,k}} \quad (5.4)$$

das auf den Wagenkasten wirkende Wankmoment, durch

$$I_{yy}^{\text{WK}} \ddot{\beta}_k = \underbrace{\sum_n (M_{n,y} + r_{n,z} F_{n,x} - r_{n,x} F_{n,z})}_{E_{1,5,k}} \quad (5.5)$$

das auf den Wagenkasten wirkende Nickmoment und durch

$$I_{zz}^{\text{WK}} \ddot{\gamma}_k = \underbrace{\sum_n (M_{n,z} + r_{n,x} F_{n,y} - r_{n,y} F_{n,x})}_{E_{1,6,k}} \quad (5.6)$$

das auf den Wagenkasten wirkende Wendemoment beschreiben. Diese Kraft- und Momentenbilanzen stellen demnach bereits geeignete Bewertungsgrößen für die Gesamtbeanspruchung der Wagenkästen dar. Sie müssen für jeden Zeitpunkt t_k ermittelt werden und seien mit $E_{1,1,k}$ bis $E_{1,6,k}$ bezeichnet.

Doch auch weiter sind vor allem jene Zeitpunkte von Interesse, zu denen die Schnittkräfte zu einer hohen Torsion, Biegung oder Scherung des Wagenkastens führen. Eine pragmatische Herangehensweise, um diese Zeitpunkte zu ermitteln, ist die Betrachtung des Wagenkastens als einen in zwei Starrkörper geteilten Quader und die Berechnung der an der Schnittebene wirkenden Normal- und Schubkräfte sowie Torsions- und Biegemomente. Für die Berechnung müssen die Schnittlasten an jeder Schnittebene jeweils in zwei Gruppen,

$$\mathcal{A}_x = \{i \in \{1, \dots, n\} \mid r_{i,x} \leq 0\} \text{ und} \quad (5.7)$$

$$\mathcal{B}_x = \{i \in \{1, \dots, n\} \mid r_{i,x} > 0\}, \quad (5.8)$$

y und z analog, geteilt werden. An jeder Schnittebene ergeben sich 6 Schnittgrößen, die – an der yz -Ebene – als Bewertungsgrößen

$$E_{2,1,k} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i \in \mathcal{A}_x} F_{x,i,k} - \sum_{j \in \mathcal{B}_x} F_{x,j,k} \right), \quad (5.9)$$

$$E_{2,2,k} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i \in \mathcal{A}_x} F_{y,i,k} - \sum_{j \in \mathcal{B}_x} F_{y,j,k} \right), \quad (5.10)$$

$$E_{2,3,k} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i \in \mathcal{A}_x} F_{z,i,k} - \sum_{j \in \mathcal{B}_x} F_{z,j,k} \right), \quad (5.11)$$

$$E_{2,4,k} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i \in \mathcal{A}_x} (M_{x,i,k} + r_{y,i} F_{z,i,k} - r_{z,i} F_{y,i,k}) - \sum_{j \in \mathcal{B}_x} (M_{x,j,k} + r_{y,j} F_{z,j,k} - r_{j,z} F_{y,j,k}) \right), \quad (5.12)$$

$$E_{2,5,k} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i \in \mathcal{A}_x} (M_{y,i,k} + r_{z,i} F_{x,i,k} - r_{x,i} F_{z,i,k}) - \sum_{j \in \mathcal{B}_x} (M_{y,j,k} + r_{z,j} F_{x,j,k} - r_{j,x} F_{z,j,k}) \right), \quad (5.13)$$

$$E_{2,6,k} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i \in \mathcal{A}_x} (M_{z,i,k} + r_{x,i} F_{y,i,k} - r_{y,i} F_{x,i,k}) - \sum_{j \in \mathcal{B}_x} (M_{z,j,k} + r_{x,j} F_{y,j,k} - r_{j,y} F_{x,j,k}) \right) \quad (5.14)$$

dienen können. Für die Teilung an der xy -Ebene und der xz -Ebene entstehen mit \mathcal{A}_y und \mathcal{B}_y beziehungsweise \mathcal{A}_z und \mathcal{B}_z analog dazu $E_{3,1,k}, \dots, E_{3,6,k}$ beziehungsweise $E_{4,1,k}, \dots, E_{4,6,k}$.

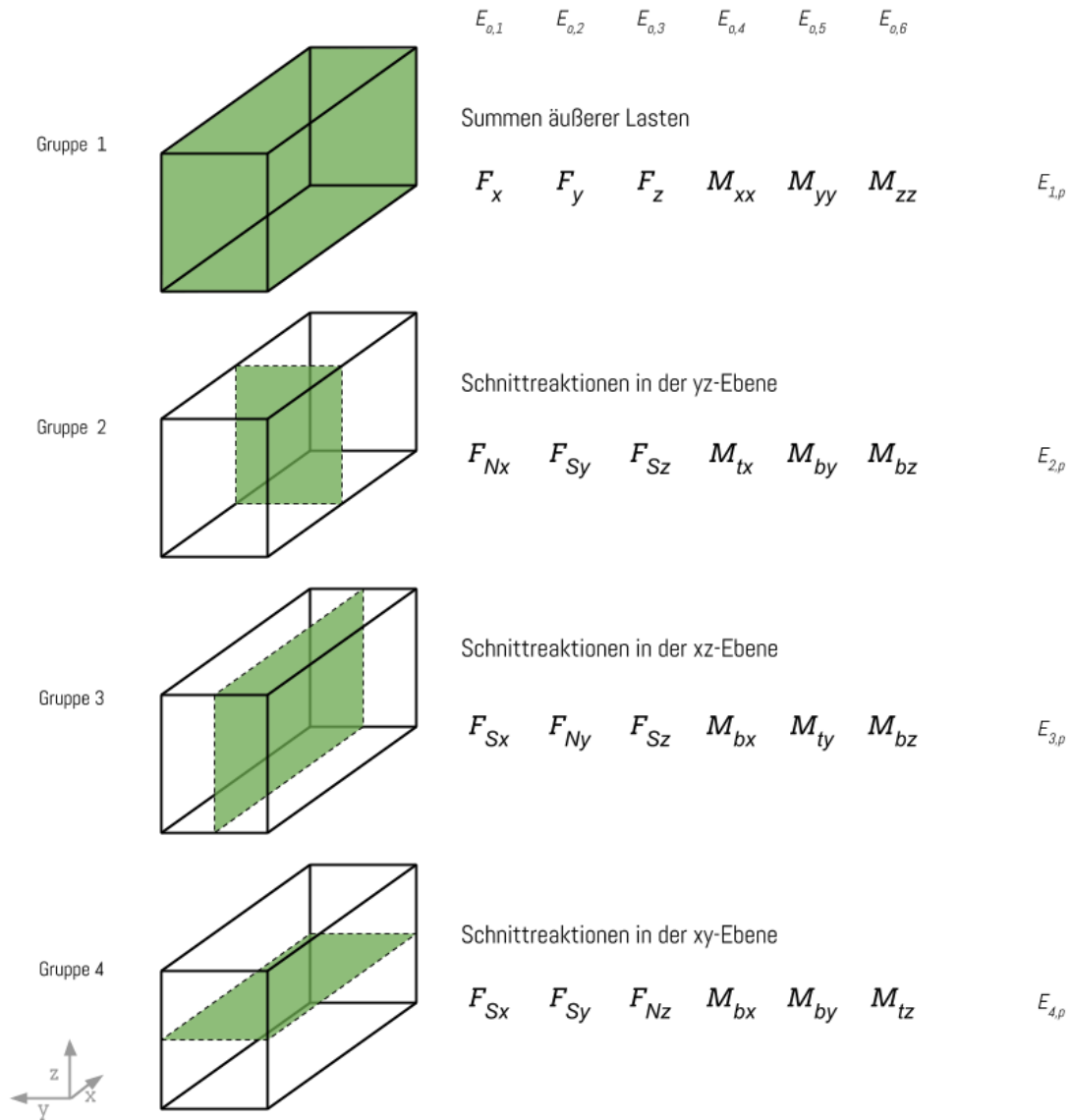


Bild 5.2: Abstrahierte Darstellung der Schnittebenen und Auflistung der 24 möglichen Bewertungsgrößen für die Bestimmung der Auswertungszeitpunkte

Bild 5.2 visualisiert die insgesamt 24 Bewertungsgrößen. Vier Größen entsprechen den in der neuen VDV-Richtlinie genannten Auswahlkriterien. Es wird an dieser Stelle vorgeschlagen, alle 24 Bewertungsgrößen für die Ermittlung der Zeitpunkte größter Belastung zu nutzen, weil außer praktischen Erfahrungswerten keine objektiven Gründe erkennbar sind, warum einzelne Bewertungsgrößen nicht einen maximalen Belastungszustand des Wagenkastens indizieren sollten.

Werden diese 24 Bewertungsgrößen für jeden Zeitpunkt t_k ermittelt, ergeben sich aus ihren Minima und Maxima insgesamt 48 Zeitpunkte $t_{\mathcal{K}}$ mit

$$\mathcal{K} := \arg \min_{k \in \{1, \dots, m\}} E_{g,i,k} \cup \arg \max_{k \in \{1, \dots, m\}} E_{g,i,k} \quad \text{für alle} \quad \begin{array}{l} g \in \{1, \dots, 4\}, \\ i \in \{1, \dots, 6\}, \end{array} \quad (5.15)$$

zu denen hohe Gesamtlasten auf den Wagenkasten wirken. Die Bilanzierung der Lasten und Ermittlung der Zeitpunkte kann problemlos und vollständig automatisiert werden, wenn wie in Kapitel 3 beschrieben eine einheitliche Schnittknotennummerierung und Schnittlastnummerierung definiert ist und im MKS-Modell wie im FE-Modell Anwendung findet. Es genügt dann, für alle in der MKS-Simulation ermittelten Schnittlasten anhand ihrer letzten Ziffer einer Kraft- oder Momentenrichtung zuzuordnen, den Ortsvektor der Krafteinleitung aus dem FE-Modell auszulesen, indem dort anhand der ersten fünf Ziffern der Schnittlastnummer der zugehörige Schnittknoten gesucht wird, und die Zeitreihen nach dem gezeigten Schema zu verrechnen.

Das erstellte Auswertungsprogramm gibt eine Kontrollgrafik je Bewertungsgröße und Wagenkasten aus, wie sie beispielhaft in Bild 5.3 dargestellt ist. Diese zeigt die Zeitverläufe der Schnittlasten (unten), die normierte Bewertungsgröße (unten, grau) sowie für die ausgewählten Zeitpunkte eine dreidimensionale Ansicht der wirkenden Lastvektoren (oben). Weiter führt das Auswertungsprogramm die ermittelten Lastvektoren in Lasttabellen zusammen. Diese Tabellen enthalten damit die Lastannahmen für die Festigkeitsauslegung der Wagenkastenstrukturen und stellen die Schnittstelle zur Festigkeitsauslegung dar.

Mit Hilfe der Lastannahmen kann am nichtreduzierten FE-Wagenkastenmodell die Ermittlung der Strukturbeanspruchung erfolgen. Dabei kann die in Abschnitt 3.5.2 aufgeführte *Inertia-Relief*-Methode genutzt werden, um die Beanspruchung durch Trägheitslasten zu berücksichtigen. Fügeparameter und lokale Strukturoptimierungen können auf diese Weise festgelegt werden, ohne dass eine Neubestimmung der Lastannahmen erforderlich wird. Wie im Folgenden diskutiert, ist dabei die Rückführung der im FE-Modell ermittelten lokalen Spannungen für die Bewertung der Modellgüte und für die Interpretation der Lastursachen von großem Nutzen.

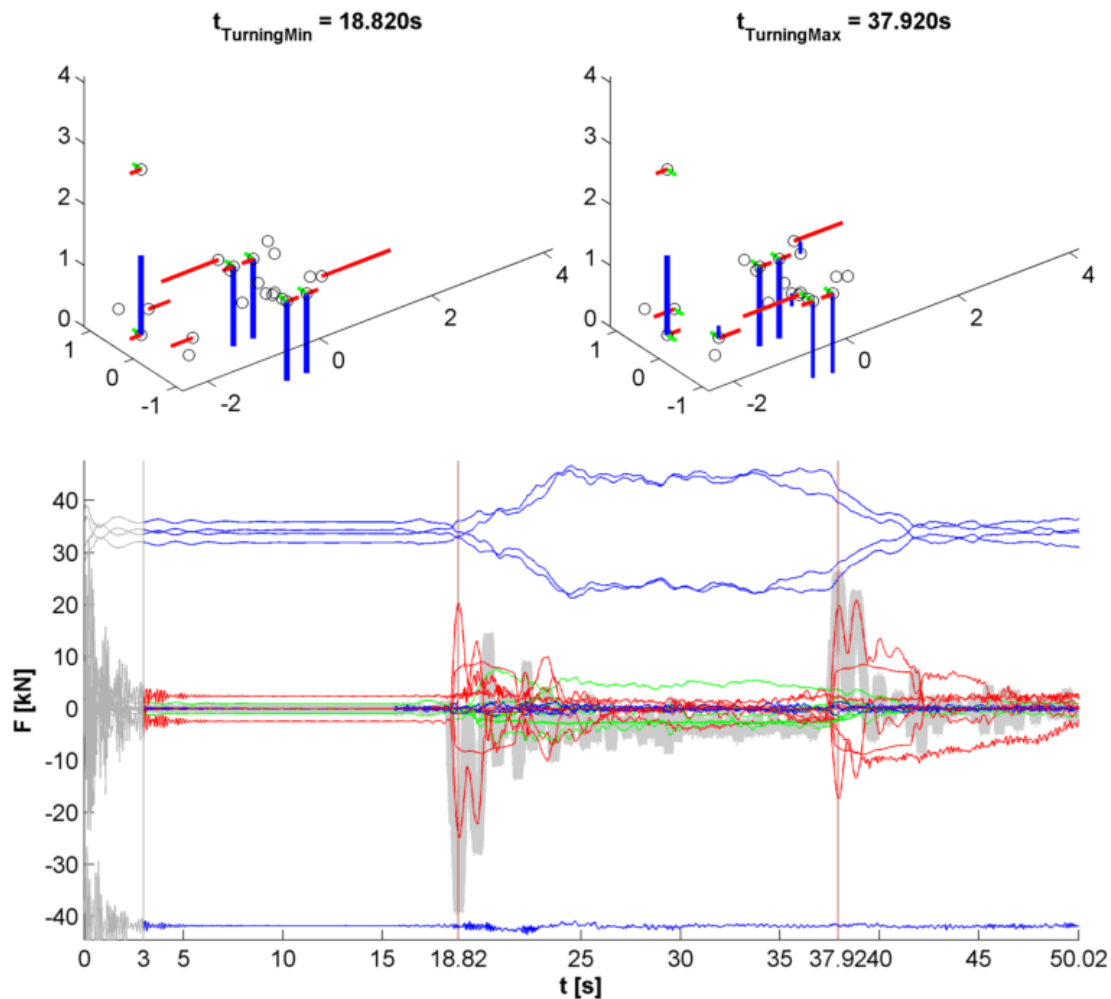


Bild 5.3: Programmausgabe der ermittelten Extrema eines Bewertungslastfalls (oben: Lastvektoren, unten: Lastzeitverläufe)

5.1.3 Ermittlung von Spannungszeitverläufen

Folgt man weiterhin der These, dass die maßgeblichen Wagenkastenbelastungen statischer und quasistatischer Natur sind, so ist es auch möglich, durch die zeitschrittweise, statische Spannungsermittlung zu Spannungszeitverläufen zu gelangen. Hierfür muss eine angemessene Zeitschrittweite festgelegt werden, beispielsweise 0,5 s. Die Lastvektoren zu diesen Zeitschritten können analog der oben beschriebenen Vorgehensweise in Lasttabellen zusammengefasst werden. Mit ihnen lassen sich anhand des nichtreduzierten FE-Wagenkastenmodells Spannungen ermitteln, die zusammen wiederum Spannungszeitreihen bilden.

Soll eine große Menge an Daten in dieser Form verarbeitet werden, ist auch hier ein automatisiertes Verfahren nötig. Für das im vorgehenden Kapitel beschriebene Programm

wurden daher Teilprogramme erstellt, die die Lastvektoren in *.bdf-Modelldateien schreiben, die diese mit Hilfe des Nastran-FE-Solvers lösen, und die Dehnungszeitreihen aus einer *.csv-Datei zurücklesen.

Werden auf diese Weise Strukturdehnungen an jenen Stellen ermittelt, an denen bei der Simulation zugrunde liegenden Messfahrt Dehnungsmessstreifen appliziert waren, lassen sie gemessene und simulierte Dehnungszeitreihen direkt miteinander vergleichen. Bild 5.4 zeigt einen solchen Vergleich am Beispiel der langsamen Bogenfahrt einer Multigelenkstraßenbahn.

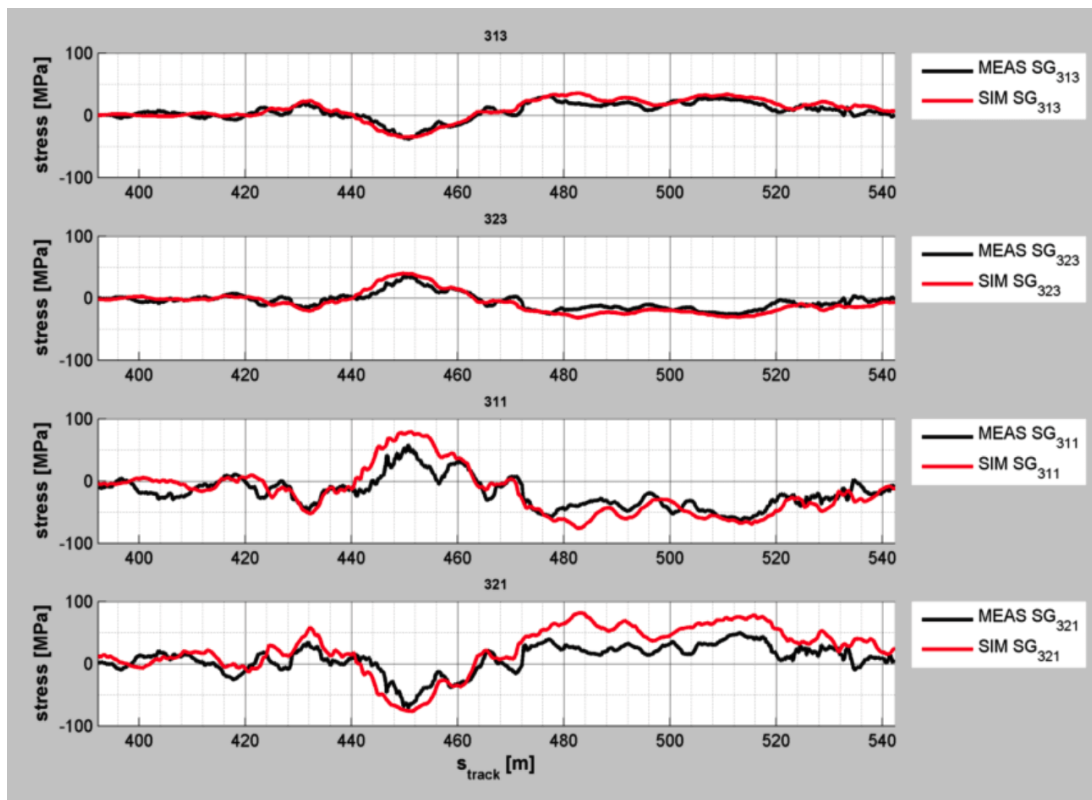


Bild 5.4: Programmausgabe zum Vergleich gemessener und simulierter Strukturspannungen (hier: Portal einer Multigelenkstraßenbahn bei Durchfahrt eines engen Bogens)

Dargestellt sind vier Messstellen, die symmetrisch in den Ecken eines Endportals – des Durchgangs zwischen zwei Wagenkästen – aufgezeichnet und simuliert wurden. Die Werte sind über der Fahrtstrecke aufgetragen, was insbesondere durch die Simulation mit dem gemessenem Fahrgeschwindigkeitsprofil möglich ist. Eine solche gemeinsame Auswertung ist nicht auf die Dehnungszeitreihen beschränkt, weitere Möglichkeiten sollen im Folgenden aufgezeigt werden.

5.2 Gemeinsame Auswertung gemessener und simulierter Zeitreihen

Durch die Bündelung von Fahrzeugmessdatenverarbeitung, Gleislagemessdatenverarbeitung, Lastfallgenerierung und Simulationsauswertung in einem einzigen Programm entstehen vielfältige Möglichkeiten, um die erlangten Daten auszuwerten sowie Hintergründe und Ursachen verständlich zu machen.

5.2.1 Möglichkeiten der gemeinsamen Darstellung

Neben der gemeinsamen Darstellung gemessener und simulierter Strukturbeanspruchung lassen sich auch alle weiteren vorliegenden Daten in gemeinsamen Diagrammen visualisieren. Unabdingbar hierfür sind die in dieser Arbeit behandelten Möglichkeiten zur Weg- und Zeitsynchronisierung der unterschiedlichen Datenquellen.

Bild 5.5 zeigt eine automatisch erstellte Auswertungsgrafik. In den Diagrammen 1 und 2 ist die Wagenkastenbeanspruchung dargestellt, hier die Strukturspannung an je vier Dehnungsmessstellen im Portal. Darunter zeigt Diagramm 3 den gleichzeitig gemessenen Fahrzeugzustand, hier die Gelenkwinkel an den unteren Gelenken sowie den Gelenkweg eines oberen Gelenks. Diagramm 4 zeigt die Differenzen des linken zum rechten Sekundärfederwegs an den drei vorhandenen Fahrwerken. Diese Differenzen gehen mit einem Kraftunterschied einher und sind daher in Näherung proportional zu den jeweils anliegenden Torsionsmomenten.

Sowohl die Gelenkwege als auch die Federwege setzen geometrische Vorgaben des Gleises um. Ist die Gleislage durch eine separate Messung bekannt – und sind Gleis- und Fahrzeugmessung synchronisiert – können wie in Diagramm 5 auch Gleislagegrößen in die gemeinsame Darstellung aufgenommen werden. Alle drei Fahrwerke befahren dasselbe Gleis mit einer bekannten Wegverschiebung – dem Fahrwerksabstand. Dies kann im Diagramm wie gezeigt berücksichtigt werden, indem wichtige Gleislagegrößen mehrfach und wegverschoben eingezeichnet werden. Folglich kann abgelesen werden, welche Gleislage an welchem Fahrwerk zu einem Zeitpunkt anliegt. Ist, wie im Beispiel, die Gleisüberhöhung an den jeweiligen Fahrwerken eingezeichnet, so lässt sich an ihrer Differenz die auf das Fahrzeug wirkende Gleisverwindung ablesen. Wird, wie ebenfalls im Beispiel, der Gleisradius dargestellt, lässt sich erkennen, welche Fahrwerke des Fahrzeugs zu einem Zeitpunkt auf der Geraden, im Bogeneingang, im Bogen, oder im Bogenausgang stehen.

Analog zur Darstellung über der zurückgelegten Wegstrecke ist eine Darstellung über der Zeit realisierbar (vgl. Formeln 2.15 und 2.16). Die Verläufe der Gleislageparameter werden in der Folge entsprechend verzerrt, verlieren jedoch nicht ihre Synchronität

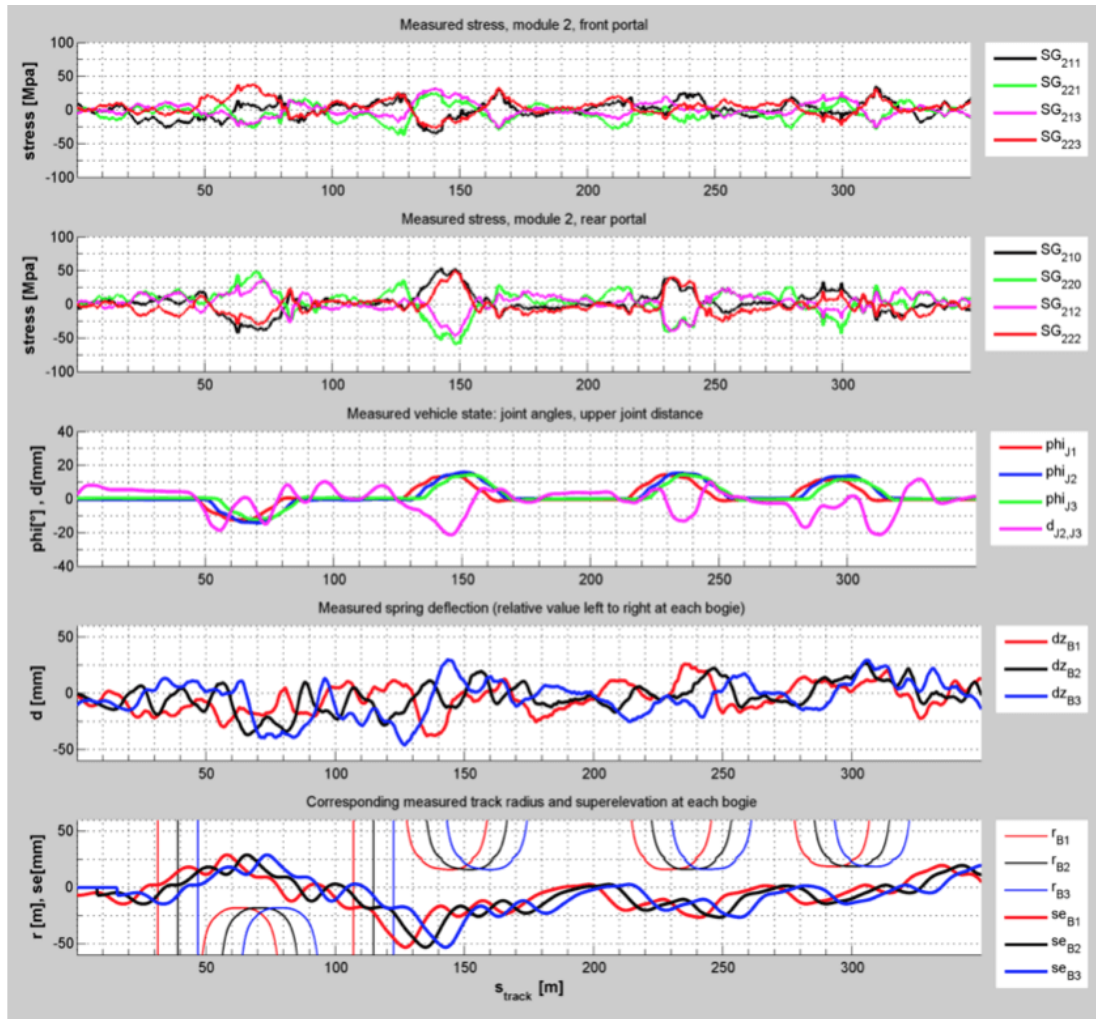


Bild 5.5: Programmausgabe von Strukturspannungen, Fahrzeugzustandsgrößen und der Gleislage, synchronisiert in einem gemeinsamen System

zur Fahrzeugmessung. Die Diagramme zeigen so ein vollständiges Bild der zu jedem Zeitpunkt herrschenden Wagenkastenbeanspruchung, der sie hervorruufenden Lasten, des vorliegenden Fahrzeugzustands und der zugrundeliegenden Gleisanregung.

Im gezeigten Beispielfall ist abzulesen, dass die höchste Strukturbeanspruchung auftritt, wenn sich das Fahrzeug bei etwa 150 m entlang des untersuchten Gleisabschnitts befindet. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich das führende Fahrwerk am Bogenausgang eines engen Bogens (mit einem Radius von etwa 20 m), während sich das mittlere Fahrwerk in der Mitte des Bogens und das hintere Fahrwerk am Bogeneingang befindet. Durch die gleichzeitig vorhandene Gleisüberhöhung neigt sich das Fahrzeug zum Bogeninneren. Die Verlagerung des Schwerpunkts und die niedrige Fahrgeschwindigkeit vergrößern diesen Wankwinkel noch geringfügig. Obwohl der befahrene Bogen in der

Ebene liegt, entsteht durch den Wankwinkel ein Nickweg am oberen Gelenk, da er eine Aufteilung der Gleiskrümmung in Ausdrehwinkel und Nickwinkel in den unteren Gelenken bewirkt. Es resultiert eine hohe Torsionsbelastung des Fahrzeugs, wie es auch an der hohen Differenz der Sekundärfederwege zwischen den Fahrwerken zu erkennen ist.

Das Beispiel zeigt so einerseits, wie die Überlagerung verschiedener Faktoren zu einer unerwarteten Lasterhöhung führen kann, und andererseits, wie sich diese Zusammenhänge sichtbar machen lassen, wenn alle verfügbaren Daten in geeigneter Weise zusammengeführt werden. Zweifellos ist jedoch auch eine stärkere Quantifizierung der erkennbaren Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Ergebnisgrößen wünschenswert, wie sie im Folgenden diskutiert werden soll.

5.2.2 Korrelation aller Einfluss- und Ergebnisgrößen

Der empirische Korrelationskoeffizient zweier zeitdiskreter Signale $x_{1..n}$ und $y_{1..n}$ wird nach BRAVAIS und PEARSON durch

$$\text{Kor}_e(x, y) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.16)$$

bestimmt. Es ergibt sich ein Korrelationswert zwischen -1 und 1 , wobei -1 einen vollständigen, negativen linearen Zusammenhang und 1 einen vollständigen positiven linearen Zusammenhang beider Signale anzeigt. Existiert kein oder zumindest kein linearer Zusammenhang zwischen beiden Signalen, ist der Korrelationskoeffizient 0 . Ab welcher Höhe ungleich 0 der Korrelationskoeffizient auf einen signifikanten Zusammen-

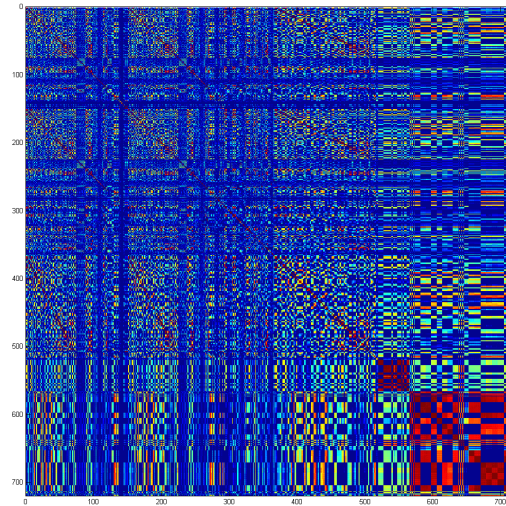


Bild 5.6: Beispiel für eine Matrix der Korrelationskoeffizienten aller Größen der Fahrzeugmessung, der Gleismessung und der Simulation eines Lastfalls

hang zwischen beiden Zeitverläufen weist, hängt entscheidend von der Länge der beiden Verläufe ab. Je mehr Abtastschritte berücksichtigt werden, desto stärker weist derselbe von Null verschiedene Korrelationskoeffizient auf einen Zusammenhang hin. Bei der Berechnung des Korrelationskoeffizienten ist es unerheblich, ob die jeweiligen Signale normiert und ob sie um ihren Gleichanteil bereinigt wurden – es gilt demnach beispielsweise $\text{Kor}_e(2X, X) = 1$ und $\text{Kor}_e(X + 1, X) = 1$.

Da alle Werte im gleichen Programm und in einem einheitlichen Bezugssystem vorliegen, ist es möglich, die Korrelationskoeffizienten zwischen allen Größen der Fahrzeugmessung, der Gleismessung und der Simulation zu bilden.

Bild 5.6 zeigt die daraus resultierende Matrix der Korrelationskoeffizienten für das bereits oben untersuchte Beispiel. Nutzbar wird sie erst durch die Betrachtung kleiner Ausschnitte oder die gezielte Abfrage von Korrelationswerten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde hier weiter auch eine Textausgabe realisiert, die alle Größenpaare mit einem

CORRELATION BETWEEN MEAS_SG110 AND		Korrelationskoeffizient zwischen den Messwerten eines Dehnungsmessstreifens (DMS) und
-- MEAS_SG111 : 0.9	{	weiteren gemessenen DMS, zum Teil an achsen- oder flächensymmetrischen Orten im gleichen Wagenkasten,
-- MEAS_SG112 : -1.0		
-- MEAS_SG113 : -0.4		
-- MEAS_SG114 : 0.5		
-- MEAS_SG115 : -0.3		
-- MEAS_SG120 : -1.0	{	gemessenen Lenkerkräften,
-- MEAS_SG311 : 0.1		
-- MEAS_F1 : -0.8	{	den Sekundärfederwegen an allen drei Fahrwerken / sechs Sekundärfedern,
-- MEAS_F2 : 0.8		
-- MEAS_D21 : -0.9		
-- MEAS_D22 : 0.9		
-- MEAS_D23 : -0.1		
-- MEAS_D24 : 0.0	{	der fahrzeugseitig bestimmten Gleiskrümmung an den Fahrwerken 1 und 3,
-- MEAS_D25 : 0.7		
-- MEAS_D26 : -0.7	{	gemessenen Schnittlasten an kraftkalibrierten Gelenken,
-- MEAS_TRACK_KR_B1 : -0.6		
-- MEAS_TRACK_KR_B3 : 0.4		
-- MEAS_IFF_11113 : -0.9		
-- MEAS_IFF_11213 : -0.9		
-- MEAS_IFF_11123 : 0.9	{	der Gleisüberhöhung an jedem Fahrwerk, gewonnen aus einer separaten, synchronisierten Gleismessung,
-- MEAS_IFF_11223 : 0.9		
-- MEAS_IFF_12111 : 0.2		
-- MEAS_IFF_12211 : 0.1		
-- MEAS_IFF_12121 : 0.0		
-- MEAS_IFF_12221 : -0.1	{	der entsprechenden Gleisverwindung bezogen auf unterschiedliche Fahrwerksabstände,
-- TRACK_SUPERELEV_B1 : 0.5		
-- TRACK_SUPERELEV_B2 : -0.2		
-- TRACK_SUPERELEV_B3 : -0.6		
-- TRACK_TWIST_B1_B2 : -0.9		
-- TRACK_TWIST_B2_B3 : -0.5	{	der entsprechenden horizontalen Gleiskrümmung,
-- TRACK_TWIST_B1_B3 : -0.9		
-- TRACK_KR_B1 : -0.6		
-- TRACK_KR_B2 : -0.1		
-- TRACK_KR_B3 : 0.4		
-- FE_MBS_STRESS_110 : 0.9	{	mit MKS und FEM simulierten Strukturspannungen an den Orten der Dehnungsmessung.
-- FE_MBS_STRESS_111 : 0.8		
-- FE_MBS_STRESS_112 : -0.8		
-- FE_MBS_STRESS_120 : -0.8		
-- FE_MBS_STRESS_311 : 0.2		
--		

Bild 5.7: Korrelation eines gemessenen Dehnungszeitsignals mit anderen Größen aus Fahrzeugmessung, Gleismessung und Simulation, Auszug Originalausgabe links, Kommentierung rechts

Korrelationskoeffizienten über einem definierten Grenzwert ausweist, oder für einzelne Größen die Korrelationskoeffizienten mit allen anderen Größen ausgibt. Ein kommentiertes Beispiel zeigt Bild 5.7.

5.2.3 Modellanalyse durch Korrelation der Fehlergrößen

Liegen identische Größen in Simulation und Messung vor, zum Beispiel über Dehnungsmessstreifen in einer Messfahrt erfasste und in der Simulation auf gleicher Strecke berechnete Strukturspannungen im Wagenkasten, kann aus diesen beiden Zeitverläufen durch Subtraktion eine zeitabhängige Fehlergröße

$$\Delta y = (y_{\text{soll}} - y_{\text{ist}}) \quad (5.17)$$

berechnet werden. Wird nun diese Abweichung jeweils nach

$$\text{Kor}_e(\Delta y, u_i), \quad (5.18)$$

mit allen i Eingangsgrößen korreliert, kann festgestellt werden, ob eine Eingangsgröße in der Simulation nicht, nicht genügend oder aber überhöht berücksichtigt wurde.

Ein Beispiel zeigt Bild 5.8. In diesem kann abgeleitet werden, dass zwei bei der Messung erfasste Schnittlasten in der Simulation unzureichend abgebildet werden, dass sich diese Lasten offenbar im Bogen bei großen Gelenkwinkeln stärker ausprägen müssten und dass an anderen Messstellen der gleiche Effekt auftritt. In Frage kommt hier etwa, dass in der Realität am oberen Gelenk hohe Kräfte durch einen Drehachsenversatz auftreten, im Modell ohne Bauteiltoleranzen jedoch nicht.

Mit Hilfe der Modellanalyse können Simulationsmodelle zielgerichtet verbessert und Fehler, wie zum Beispiel eine mit einem Vorzeichen- oder Skalierungsfehler behaftete Eingangsgröße, erkannt werden. Korreliert die Fehlergröße mit keiner Eingangsgröße, deutet es hingegen darauf hin, dass eine wesentliche weitere Eingangsgröße in der Betrachtung gänzlich fehlt.

CORRELATION BETWEEN DELTA_211 AND		Korrelationskoeffizienten zwischen der	
-- MEAS_PhiJ1 :	0.8	Dehnungsdifferenz aus Messung und Simulation und	
-- MEAS_IFF_2621 :	0.9	} dem Ausdrehwinkel des ersten Gelenks	
-- MEAS_IFF_2622 :	-0.9	} gemessenen Schnittlasten an kraftkalibrierten	
-- TRACK_KR_B1 :	0.8	} Gelenken,	
-- DELTA_211 :	1.0	} der horizontalen Gleiskrümmung,	
-- DELTA_213 :	-1.0	} den Differenzgrößen Messung zu Simulation anderer	
-- DELTA_221 :	-0.9		
-- DELTA_223 :	0.9		
---		Dehnungsmessstellen	

Bild 5.8: Korrelation der Differenz des gemessenen und simulierten Dehnungszeitsignals mit allen anderen vorliegenden Größen, Darstellung aller Werte mit Betrag größer 0,8

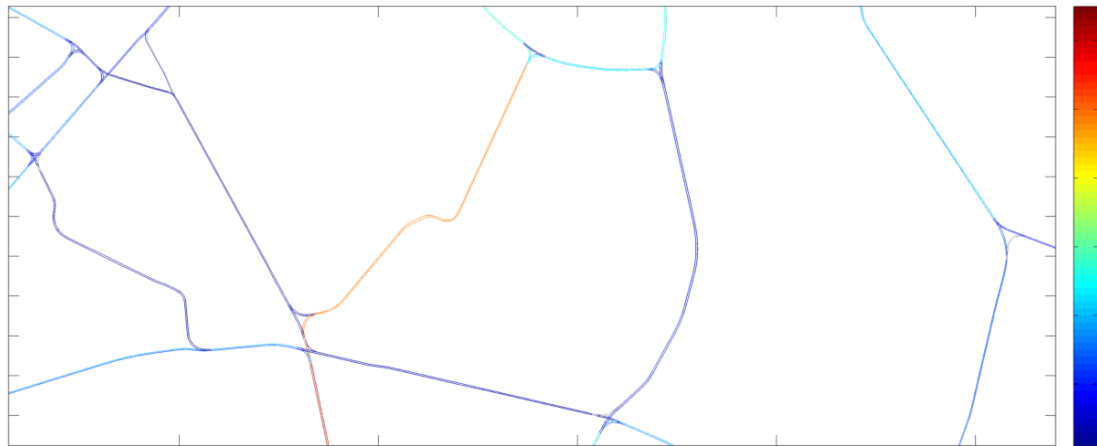


Bild 5.9: *Heatmap* der Messstraßenbahn Dresden: Anzahl Fahrten je Gleissegment über 163 000 km Fahrtstrecke, normiert auf 1250, Ausschnitt

5.2.4 Analyse des Betriebsspiegels

Langzeitmessungen an Fahrzeugen ermöglichen statistische Auswertungen mit dem Ziel, die tatsächlichen Anforderungen an Fahrzeuge im Betrieb zu beschreiben. Eine solche Analyse des Betriebsspiegels wird im Folgenden ausschnittsweise anhand der umfangreichen Datenbasis der in Abschnitt 2.3.1 vorgestellten **Messstraßenbahn Dresden** durchgeführt. Die Ergebnisse sind zum Teil inhaltlich, vor allem jedoch methodisch auf andere Langzeitmessungen, das heißt andere Fahrzeugtypen, Gleisnetze und Messsysteme, übertragbar.

Die gemessenen Rohdaten des Langzeitmessträgers sind nach dem in Abschnitt 2.3.2 gezeigten Verfahren verarbeitet und auf durchgängige Plausibilität geprüft. Hieraus können 1 025 Messabschnitte gewonnen werden. Diese Messabschnitte umfassen zusammen rund 11 400 Stunden Messdauer und rund 163 000 Kilometer Fahrtstrecke im regulären Betrieb. Mit dem in Abschnitt 2.5.2 gezeigten Verfahren lässt sich jedem Zeitpunkt der Messung ein Ort des Gleisnetzes zuordnen.

Zunächst soll die Zusammenstellung der vom Fahrzeug **befahrenen Trassierung** ausgewertet werden. Hierfür kann als erstes eine *Heatmap* des Gleisnetzes erstellt werden, indem durch Auszählen der befahrenen Gleissegmente eine Häufigkeitsverteilung ermittelt wird und die Gleissegmente mit einer Farbcodierung entsprechend ihrer jeweiligen Häufigkeit in einer Karte eingezeichnet werden. Bild 5.9 zeigt eine solche Heatmap für die Messstraßenbahn Dresden.

Wie in Kapitel 2 dargelegt, ist es bei einem Versuchsträger einer Langzeitmessung nicht realisierbar, mit den gemessenen Fahrten die tatsächlichen Fahrten vollständig abzudecken. Prinzipiell muss selbst bei einer Serien-Langzeitmessung von diesem Umstand ausgegangen werden. In der Regel ist jedoch die Annahme gültig, dass die erfassten Fahr-

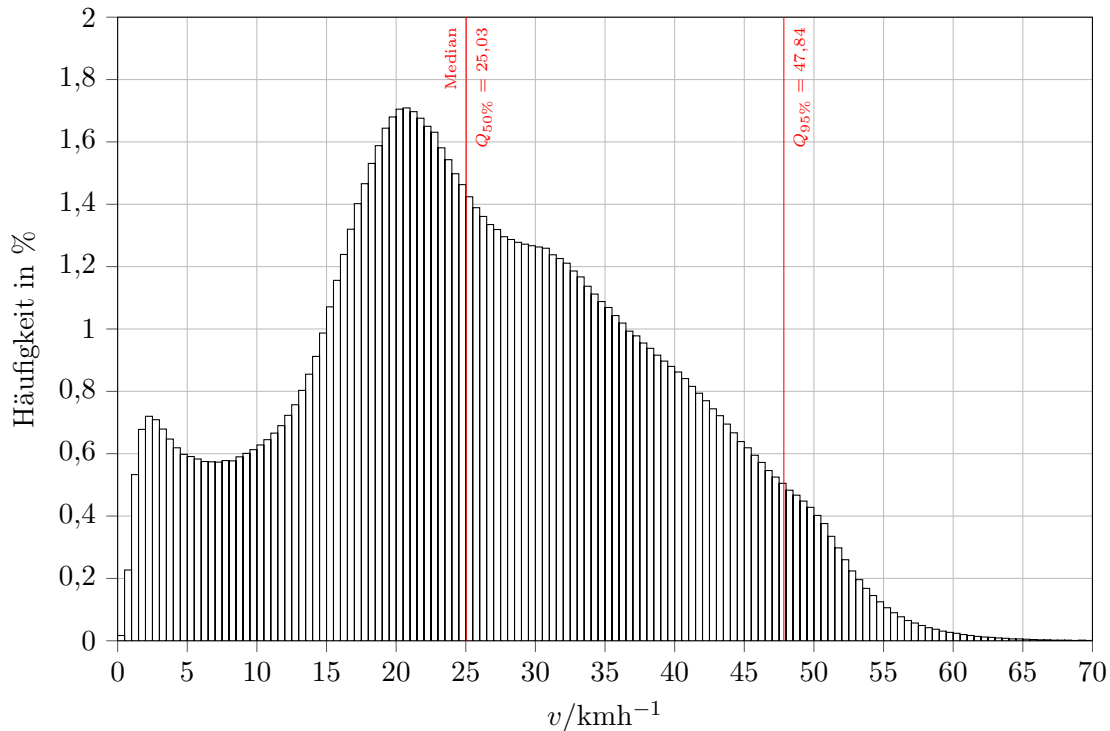


Bild 5.10: Histogramm der Fahrgeschwindigkeiten größer Null, basierend auf $41 \cdot 10^6$ Messsekunden, 140 Klassen, Klassenbreite $0,5 \text{ km/h}$

ten eine sehr repräsentative Stichprobe aller stattgefunden Fahrten darstellen. Daher ist es möglich, nichtgemessene Fahrten über die aus den Messdaten bekannte gemessene Fahrtstrecke und die vom Fahrzeugkilometerzähler bekannte tatsächliche Fahrtstrecke zu interpolieren. Der Rückschluss, dass die tatsächliche Fahrtstrecke des einzelnen Messfahrzeugs auch repräsentativ für die tatsächliche Fahrtstrecke der Fahrzeugflotte eines Betreibers ist, ist jedoch unzulässig, da die Fahrzeugzuteilung oft nichtrandomisiert nach systematischen Gesichtspunkten erfolgt.

Eine **Auswertung der Längsdynamik**, das heißt der Fahrgeschwindigkeiten, der Traktions- und Bremsbeschleunigungen und der Haltevorgänge, kann über eine Analyse der Fahrgeschwindigkeit erfolgen. Das Hinzuziehen der gemessenen Längsbeschleunigungen ist hingegen ungeeignet, da sie auch die Hangabtriebsbeschleunigung umfassen.

Zunächst kann die Häufigkeit der gemessenen Fahrgeschwindigkeiten ermittelt werden. Eine geeignete Darstellungsform ist das Histogramm. Durch den enormen Stichprobenumfang, im vorliegenden Fall $41 \cdot 10^6$ Messsekunden, kann eine sehr kleine Klassenbreite gewählt werden. Bild 5.10 zeigt das entsprechende Histogramm für eine Klassenbreite von $0,5 \text{ km/h}$. Es ist sichtbar, dass die häufigste Fahrgeschwindigkeit 21 km/h beträgt. Ergänzend können verschiedene Quantile berechnet werden. Das 50%-Quantil,

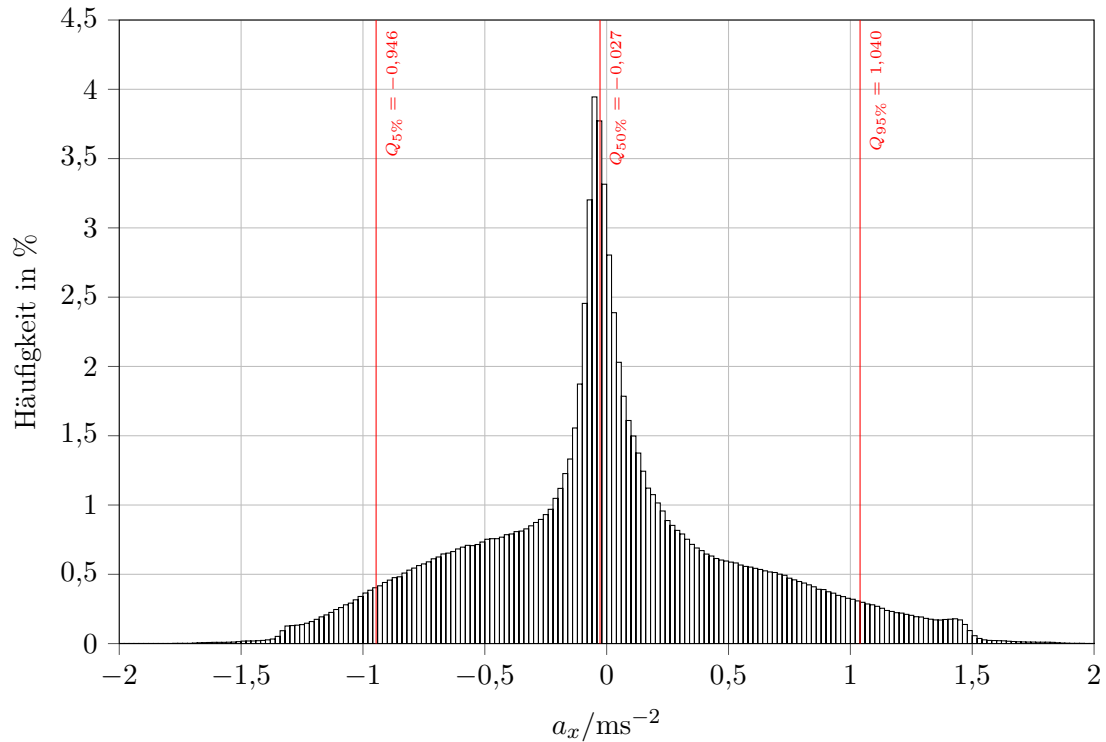


Bild 5.11: Histogramm der Längsbeschleunigungen bei Fahrgeschwindigkeiten größer Null, basierend auf $41 \cdot 10^6$ Messsekunden. 200 Klassen, Klassenbreite $0,02 \text{ m/s}^2$.

der Median, liegt bei diese Untersuchung bei 25 km/h , was bedeutet, dass sich das Fahrzeug die Hälfte der Fahrzeit mit weniger und die Hälfte der Fahrzeit mit mehr als 25 km/h bewegt. Das 95%-Quantil liegt bei 48 km/h , das heißt das Fahrzeug wird nur ein zwanzigstel der Fahrzeit mit mehr als 48 km/h betrieben.

Liegen Erkenntnisse dieser Art bei der Fahrzeugentwicklung vor, kann der Fokus gezielt darauf gerichtet werden, die Lasten häufiger Betriebsmodi durch die gezielte Fahrzeugauslegung zu reduzieren. Unter Umständen kann dies durch Inkaufnahme höherer Lasten bei seltenen Betriebszuständen erfolgen und dennoch zu einer Reduzierung der Gesamtbelastung führen.

Mit Blick auf die Längsdynamik ist es von besonderem Interesse, mit welcher Beschleunigung die unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchfahren werden. Analog zur Geschwindigkeitsverteilung zeigt Bild 5.11 die Häufigkeitsverteilung der Längsbeschleunigung a_x bei $v_k > 0$, eingeteilt in 200 Klassen der Klassenbreite $0,02 \text{ m/s}^2$. Deutlich sichtbar ist die häufige Fahrt mit nahezu konstanter Geschwindigkeit, bei der lediglich kleine Verzögerungen zwischen $-0,02 \text{ m/s}^2$ und $-0,06 \text{ m/s}^2$ aufgrund des Fahrwiderstands wirken. Dennoch ist auch das ausgeprägte Beschleunigungs- und Bremsvermögen des Fahrzeugs erkennbar.

durch den Zustand

$$H_k = (v_{k-1} > 0) \wedge (v_k = 0) \quad \text{für alle } k \in \{2, \dots, m\}, \text{ wobei } H_k \in \{0, 1\}, \quad (5.19)$$

ausgedrückt werden. Der mittlere Wegabstand \bar{D} zwischen zwei Halten ergibt sich dann als

$$\bar{D} = \frac{s_m}{\sum_{k=2}^m H_k}, \quad (5.20)$$

während für die mittlere Fahrtzeit \bar{T} zwischen zwei Halten

$$\bar{T} = \frac{\Delta t \sum_{k=2}^m (v_k > 0)}{\sum_{k=2}^m H_k} \quad (5.21)$$

gilt. Für die betrachtete Langzeitmessung ergeben sich bei etwa 320 000 untersuchten Haltevorgängen die Werte

$$\bar{D} = 439 \text{ m} \quad \text{und} \quad \bar{T} = 61,4 \text{ s.}$$

Dies entspricht gängigen Annahmen für Fahrzeuge des Nahverkehrs.

5.3 Zählverfahren zur Auswertung von Spannungszeitreihen

In Abschnitt 5.1 werden Lastvektoren aufgestellt, mit denen sich Ober- und Unterspannungen für den Dauerfestigkeitsnachweis ermitteln lassen. Auch bei bekannten Spannungszeitreihen, die, wie in Abschnitt 5.1.3 gezeigt aus Lastzeitreihen gewonnen oder wie in Abschnitt 2.1.5 beschrieben aus der Dehnungsmessung abgeleitet werden, ist das Führen eines Dauerfestigkeitsnachweises möglich. Hierfür können für die untersuchten Auswertungsstellen auf direktem Wege, das heißt ohne den Umweg einer Bewertungsgröße, die jeweils minimal und maximal erreichten Strukturspannungen ausgelesen werden. Diese Spannungsamplitude, die Beanspruchung, wird der ertragbaren Spannung, der Beanspruchbarkeit, gegenübergestellt.

Der Dauerfestigkeitsnachweis führt in der Regel zu einer konservativen Auslegung, da er die typischerweise hohe Amplitudenstreuung der Wagenkastenbeanspruchungen, die aus der Vielzahl der Betriebszustände resultiert, nicht mildernd berücksichtigt. Es ist

der optimalen Festigkeitsauslegung daher dienlich, wenn anhand von Spannungszeitreihen ein Betriebsfestigkeitsnachweis [Hai06] der Wagenkastenstruktur geführt wird, bei dem die Materialermüdung durch Beanspruchung mit unterschiedlichen Amplituden dezidiert betrachtet wird.

Die Grundlage dieser Betrachtung bildet die Hypothese der *linearen Schadensakkumulation*. Sie basiert auf den Arbeiten von PALMGREN, LANGER und MINER [Pal24; Lan37; Min45]. Die Hypothese besagt im Kern, dass die Teilbeanspruchungen, die ein Bauteil jeweils mit unterschiedlichen Spannungsamplituden erfährt, Teilschädigungen bewirken, die getrennt ermittelt und aufaddiert werden können. Grundlage für eine Beurteilung der Betriebsfestigkeit ist daher zunächst das Erfassen der Häufigkeiten einzelner Spannungsamplituden. Hierfür existieren mehrere, im Folgenden behandelte Zählverfahren.

5.3.1 Existierende Zählverfahren

Zunächst sollen verschiedene Zählverfahren vorgestellt und ihre Eignung für das Untersuchungsziel hinterfragt werden. Als maßgeblich für die behandelten Zählverfahren kann die Norm *ASTM E1049* [Astm85] gelten. Die gemeinsame Basis der Verfahren besteht darin, die Zeitreihen zunächst auf die enthaltenen Umkehrpunktfolge zu vereinfachen, sowie den Wertebereich in Klassen zu unterteilen, um das Ergebnis in einer Zählmatrix festhalten zu können. Diese vereinfachte Betrachtungsweise, die unvermeidlich mit einem starken Informationsverlust einhergeht, wird in Bild 5.13 gezeigt.

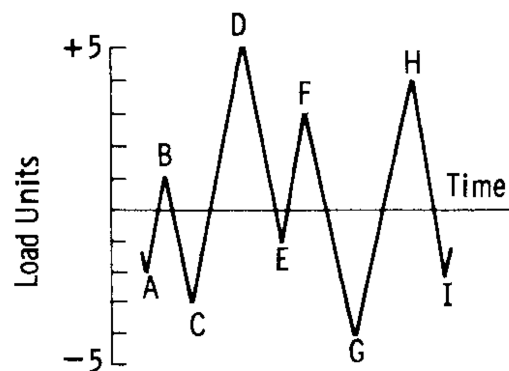


Bild 5.13: Beispiel eines Lastverlaufs nach der Betrachtungsweise der ASTM E1049 [Astm85]

Das *Simple-Range Counting* erkennt jede Spanne zwischen zwei Umkehrpunkten als halbe Schwingung. Problematisch ist diese Zählweise bereits bei der Überlagerung des Signals mit einer höherfrequenten Schwingung oder einem Rauschen, da dann einzelne große Schwingungsamplituden in viele kleine Amplituden geteilt werden. Beim *Level-Crossing Counting* werden ausgehend von der Mittelspannung Klassen mit festen Be-

reichsgrenzen in positiver wie negativer Richtung festgelegt. Jedes Überschreiten dieser Grenzwerte wird gezählt. Um Fehlzählungen zu vermeiden, die entstehen, wenn der Spannungszeitverlauf mit kleiner Amplitude um einen Grenzwert schwingt, müssen zusätzliche Zählbedingungen eingeführt oder die Umkehrpunktfolge nach festzulegenden Kriterien vorgefiltert werden.

Beim *Peak Counting* werden die Extremwerte des Zeitverlaufs dem jeweiligen Spannungsbereich zugeordnet (klassiert) und gezählt. Auch hierbei müssen Maßnahmen getroffen werden, um das Zählen von Schwingungen mit kleiner Amplitude zu vermeiden. Ein gängiges Verfahren hierzu ist das *Mean-Crossing Peak Counting*. Bei diesem werden die Extremwerte nur erfasst, wenn zuvor ein Durchgang durch die Mittelspannung stattgefunden hat.

Die Stärke der genannten Zählverfahren liegt in ihrer schnellen und eindeutigen Anwendbarkeit. Die Gültigkeit ihrer Ergebnisse hängt jedoch stark von den Eigenschaften der betrachteten Spannungsverläufe ab, wie durch DOWLING in [Dow71] analysiert und praktisch gezeigt wird. Für die unregelmäßigen Spannungszeitverläufe des betrachteten Anwendungsfalls, mit einem großen Anteil an Schwingspielen ohne Nulldurchgang, sind die Verfahren daher nicht einsetzbar.

Stand der Technik und in der Praxis verbreitet ist das **Rainflow Counting**, wobei der Begriff in der Literatur nicht einheitlich genutzt wird. Grundidee des Rainflow-Verfahrens und Gemeinsamkeit aller Umsetzungen ist das Zählen von Schwingspielen, wie sie im Spannungs-Dehnungs-Diagramm als geschlossene Hysteresen sichtbar werden. Nichtgeschlossene Hysteresen verbleiben hierbei als *Residuen*. Das Erkennen der Hystereseschleifen ist gleichermaßen anhand des Spannungs- oder Dehnungszeitverlaufs und dabei immer durch die Analyse ihrer Umkehrpunktfolgen möglich. Trotz des idealisierten und dadurch eindeutigen Materialverhaltens ist die Formalisierung dieser Hystereserkennung überraschend schwierig, da der Werteverlauf immer im Kontext des Gesamtsignals gesehen werden muss. Insbesondere können Hystereseschleifen beliebig oft – und rekursiv – von kleineren, gegenläufigen Hystereseschleifen unterbrochen werden, bevor sie sich gegebenenfalls selbst schließen.

Die ersten Veröffentlichungen zum Rainflow-Verfahren von ENDO [EMN67; EMNI67] und MATSUISHI [ME68] sind nur schwer auffindbar – ausschnittsweise jedoch in [End92] abgedruckt. Sie sind in japanischer Sprache verfasst und entziehen sich aufgrund ihrer Handschriftlichkeit der maschinellen Übersetzung. Englischsprachig wird der Rainflow-Algorithmus erstmalig in [Dow71] erwähnt und dort ausschließlich [ME68] referenziert, worin begründet liegen mag, warum in westlicher Fachliteratur trotz besagter Sprachbarriere meist [ME68] als Quelle genannt wird. In japanischer Fachliteratur wird oft auf [EMMKT74] verwiesen, wo das Verfahren durch seine Begründer ausführlich und im Drucksatz publiziert ist.

Der ursprüngliche Algorithmus löst die Aufgabe der Hystereseeerkennung in zwei Schritten. Als erstes werden halbe Hystereseschleifen erkannt und als zweites werden diese halben Hystereseschleifen zu vollen Hystereseschleifen zusammengefügt oder verbleiben als Residuum. Diese Aufteilung ist geschickt gewählt: Zum einen ist stets bekannt, dass in jedem Umkehrpunkt genau eine halbe Hystereseschleife beginnt. Zum anderen ist die Erkennung der zusammengehörenden halben Hystereseschleifen trivial, da beide identische Unter- sowie Oberspannungen aufweisen. Kompliziert ist es hingegen, für jede der halben Hystereseschleifen festzustellen, wann sie endet. Der hierfür nötige, eindeutige aber abstrakte Regelsatz wird in der ursprünglichen Methode ausschließlich anhand einer Merkregel erklärt, die sich wie folgt umschreiben lässt:

Drehe den Zeitverlauf so, dass die Zeitachse nach unten zeigt und die linear verbundenen Umkehrpunkte von links wie rechts betrachtet jeweils ein Pagodendach bilden. An jedem Umkehrpunkt entstehe an der Innenseite ein Regenfluss, der dieses Dach solange entlang und herunter fließe, bis er

- (a) die Quelle eines Regenflusses passiert, die weiter innen liegt als die eigene Quelle, oder
- (b) mit einem Regenfluss zusammenläuft, der früher, also weiter oben gestartet ist, oder
- (c) den Boden erreicht.

Jeder dieser so entstehenden Regenflüsse entspricht einer halben Hystereseschleife mit korrekten Start- und Endzeiten sowie korrekten Start- und Endwerten, obwohl selbstverständlich kein physikalischer Zusammenhang besteht, was mitunter kritisiert wird. Bild 5.14a veranschaulicht das Zählverfahren mit einer Originaldarstellung aus [EMMKT74]. Das Verfahren kann problemlos von Hand durchgeführt werden, während die bildliche Beschreibung für die Programmierung zunächst hinderlich scheint. In der Folge haben sich hier andere Algorithmen durchgesetzt, die den Zeitverlauf nach dem *Trial-and-Error*-Prinzip auf nichtunterbrochene Hystereseschleifen absuchen, diese zählen und aus dem Signal entfernen. Da ihre Hystereseeerkennung auf dem Vergleich dreier oder vierer benachbarter Umkehrpunkte basiert, werden sie oft als Dreipunkt- oder Vierpunktalgorithmen bezeichnet. Auch diese Erkennungsform wird in [EMMKT74] beschrieben (Bild 5.14b).

In der einschlägigen Literatur sind auch für diese Variante der Rainflow-Zählung keine funktionalen, sondern lediglich imperative Beschreibungen aufzufinden, was ihre

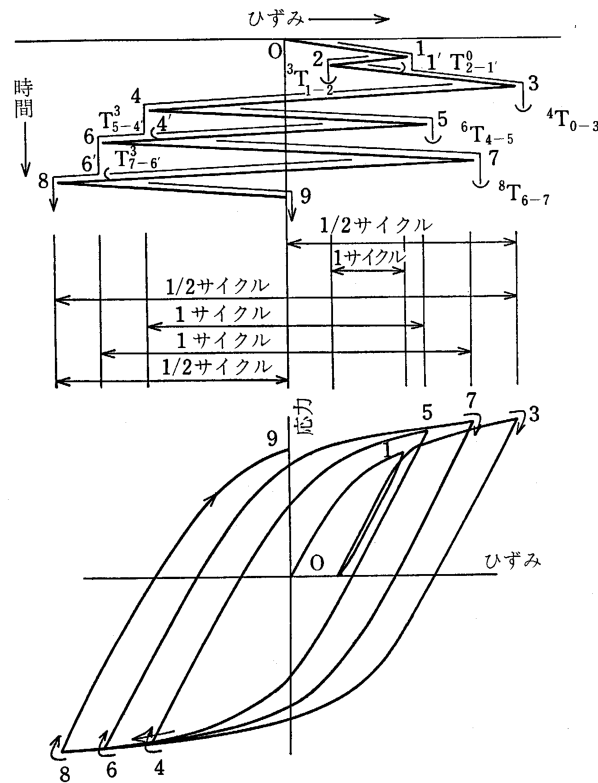
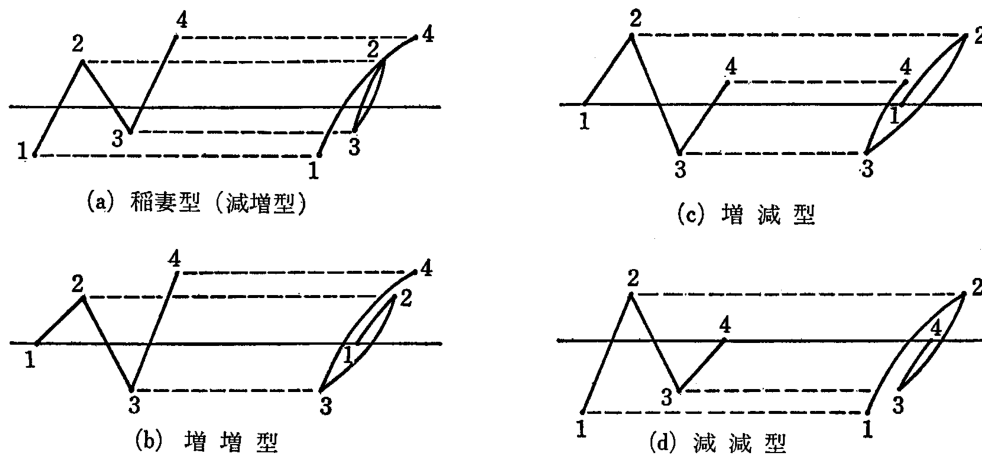


図8 狭義の Rain Flow Method による有効区間

- (a) Rainflow-Algorithmus: Gedrehter Dehnungszeitverlauf, Erkennung halber Schwingenspiele, Zusammenfassung zu geschlossenen Hysteresen (1) und Residuen (1/2), Darstellung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm



- (b) Vierpunktalgorithmus: Erkennung geschlossener Hysteresen durch Vergleich benachbarter Extremwerte

Bild 5.14: Originaldarstellungen der Rainflow-Methode nach ENDO et al. [EMMKT74]

Umsetzung in modernen Programmiersprachen erschwert. Beispielsweise definiert die ASTM E1049 [Astm85] den Rainflow-Algorithmus wie folgt:

„Let X denote range under consideration; Y , previous range adjacent to X ; and S , starting point in the history.

- (1) Read next peak or valley. If out of data, go to Step 6.
- (2) If there are less than three points, go to Step 1. Form ranges X and Y using the three most recent peaks and valleys that have not been discarded.
- (3) Compare the absolute values of ranges X and Y .
 - a) If $X < Y$, go to Step 1.
 - b) If $X \geq Y$, go to Step 4.
- (4) If range Y contains the starting point S , go to Step 5; otherwise, count range Y as one cycle; discard the peak and valley of Y ; and go to Step 2.
- (5) Count range Y as one-half cycle; discard the first point (peak or valley) in range Y ; move the starting point to the second point in range Y ; and go to Step 2.
- (6) Count each range that has not been previously counted as one-half cycle. “

Viele ähnliche Algorithmen, zum Beispiel [SSB79], [DS82], [Ryc87] und [GK87], entstanden in den 1980er- und frühen 1990er-Jahren. Sie sind im besonderen Maße auf geringe Rechen- und Speicheranforderungen getrimmt, um damalige Rechentechnik optimal zu nutzen. Diese Optimierung ist im heutigen Umfeld nicht mehr von ausschlaggebender Bedeutung. Die Ergebnisse dieser Zählverfahren unterscheiden sich in der Regel dann geringfügig, wenn der Spannungszeitverlauf nicht mit einem globalem Minimum oder Maximum beginnt, sowie dann, wenn sich Werte in kurzer Folge wiederholen – letzteres ein weitgehend vermeidbarer Effekt, der durch die niedrige Auflösung nach der Klassierung auftritt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass für die Auswertung der Spannungszeitreihen an Wagenkastenstrukturen von Straßen- und Stadtbahnen nur Zählverfahren auf Basis geschlossener Hystereseschleifen in Frage kommen. Diese werden gleichsam unter dem Begriff der Rainflow-Zählung geführt, für die unterschiedliche Algorithmen existieren, die im Rahmen der gesuchten Genauigkeit zu identischen Ergebnissen führen.

Wohl auch durch den rechentechnisch hohen Anspruch wird es in der Literatur als gesetzt angesehen, den Rohdatenverlauf vor der Rainflow-Zählung zu vereinfachen, obwohl es für die zugrundeliegende Theorie nicht erforderlich ist. So ist keine Eliminierung kleiner Schwingspiele notwendig, da die Zählung der besonders relevanten größeren Schwingspiele durch sie nicht beeinflusst wird. Auch ist weder das Verwerfen der Zeitinformationen noch das Herabsetzen der Auflösung durch Klassierung zwingend erforderlich.

5.3.2 Vorbetrachtung kontexterhaltender Rainflow-Verfahren

Während bei gezielten, abschnittswisen Messfahrten die Einflussfaktoren für die Fahrzeugbelastung oft bekannt sind oder sogar explizit gewählt werden (zum Beispiel über die Wahl der Beladung und der Fahrtstrecke), sind die Einflüsse bei Langzeitmessungen zunächst unbekannt. So sind Gleislage, Fahrzeugmasse, Fahrstil, Niederschlag und viele weitere Einflussfaktoren nicht direkt dokumentierbar. Werden Spannungszeitverläufe mit einem der gängigen, stark komprimierenden Zählverfahren ausgewertet, ist zwar ein Ergebnis ermittelbar, seine Interpretation ist jedoch nur pauschal über den gesamten Messzeitraum und über jene Einflussfaktoren möglich, die über den gesamten Zeitraum konstant sind. Selbst eine Plausibilitätsprüfung des komprimierten Ergebnisses ist praktisch nicht möglich.

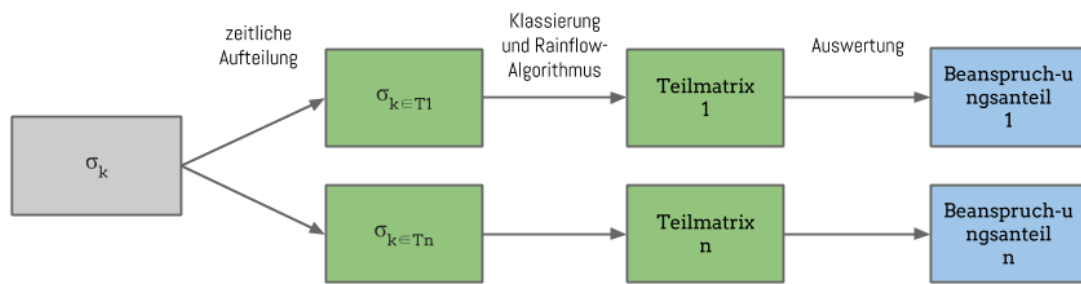
In bisherigen Veröffentlichungen im Bereich Straßen- und Stadtbahnen, zum Beispiel [BSH11], wird dieses Problem ebenfalls erkannt und vor allem der Wunsch deutlich, eine Beschreibung der Strukturbeanspruchung in Abhängigkeit des Ortes zu erhalten. Ein in der Literatur verfolgter Ansatz ist, die Spannungszeitverläufe zunächst anhand eines weiteren Signals zeitlich aufzuteilen. Diese einzelnen Abschnitte können mit der Rainflow-Klassierung ausgewertet werden, um zu Aussagen zu gelangen, welche Abschnitte das Fahrzeug maßgeblich beanspruchen. Diesen Ansatz zeigt Bild 5.15a.

Obwohl er zunächst das Ziel erreicht, überhaupt einen Zusammenhang zwischen Einflussfaktoren und Beanspruchung herzustellen, birgt er auch Unzulänglichkeiten. Insbesondere problematisch ist, dass vergleichsweise kurze Zeitabschnitte entstehen können, wodurch Hystereseschleifen regelmäßig getrennt werden. Dies verfälscht das Ergebnis, was daran gezeigt werden kann, dass die Summe aller Rainflowmatrizen nicht mehr der Rainflowmatrix des ungestückelten Gesamtsignals entspricht.

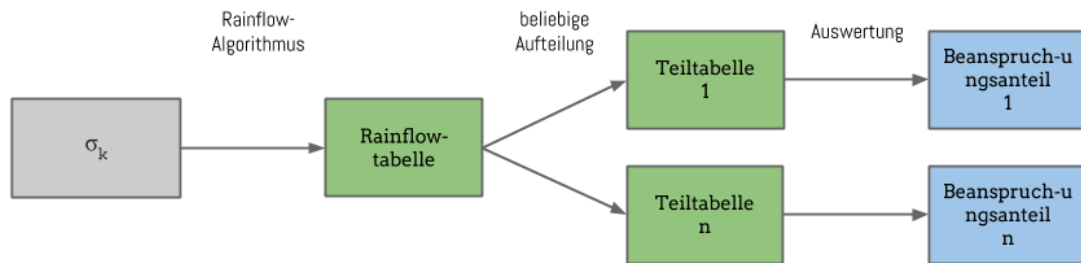
Mit Hilfe des Rainflow-Verfahrens lässt sich für eine Messstelle über eine beliebig lange Messung ein Beanspruchungskollektiv bilden. Ermittelt eine Auswertungsmethodik nun für Teilbereiche der Messung Teilkollektive, muss, wenn die Summe der Teilbereiche der Gesamtmessung entspricht, auch die Summe der Teilkollektive dem Gesamtkollektiv

tiv entsprechen. Die in der Literatur vorgestellten Vorgehensweisen [BSH11; RMDH12] erfüllen diese Voraussetzung nicht. Dies gilt gleichermaßen, wenn aus den so erstellten Teilkollektiven Bauteilbelastungen, zum Beispiel als Schädigungssumme, ermittelt werden. Auch dann entspricht die Summe der Teilschädigungssummen nicht der Gesamtschädigungssumme, was der Theorie der linearen Schadensakkumulation widerspricht.

Ist die Rainflow-Zählung Teil der Auswertungsmethodik, darf der Messabschnitt zeitlich nicht beliebig geteilt werden. Der kleinste Bestandteil ist die geschlossene Hystereseschleife und gegebenenfalls das Residuum. Im Zeitbereich ist jedoch keine Trennung des Signals zwischen geschlossenen Hystereseschleifen möglich, da diese beliebig ineinander verschachtelt sein können.



(a) Bisherige Verfahrensweise



(b) Vorgeschlagene Verfahrensweise

Bild 5.15: Kontextabhängige Beanspruchungsermittlung

Daher wird ein neues Verfahren vorgeschlagen, bei dem, wie in Bild 5.15b gezeigt, zuerst die geschlossenen Hystereseschleifen des Gesamtsignals ermittelt werden, um sie erst im Anschluss nach Einflussfaktoren aufzuteilen. Damit die Aufteilung zu diesem späteren Zeitpunkt möglich ist, muss der Verlust all jener Informationen verhindert werden, nach denen die Aufteilung vorgenommen werden soll.

5.3.3 Rainflow-Verfahren ohne Informationsverlust

Wie oben beschrieben, teilen die existierenden Rainflow-Algorithmen drei für den Informationsverlust maßgebliche Eigenschaften:

- (1) Verlust jeglicher Zeitinformation (durch Verwerfen),
- (2) Verlust der Wertverläufe zwischen lokalen Extrema (durch Verwerfen) und
- (3) Verlust der Wertegenauigkeit an den lokalen Extrema (durch frühzeitige Klassierung der Werte).

Für die reine, kontextfreie Festigkeitsbewertung stellt dies keinen Mangel dar. Jedoch ist auch keine der drei Maßnahmen für die Kernfunktion der Rainflow-Zählung – das Erfassen von Hystereseschleifen – zwingend erforderlich. Es stellt sich die Frage, wie der Rainflow-Algorithmus gestaltet werden muss, um einen möglichst geringen Informationsverlust aufzuweisen.

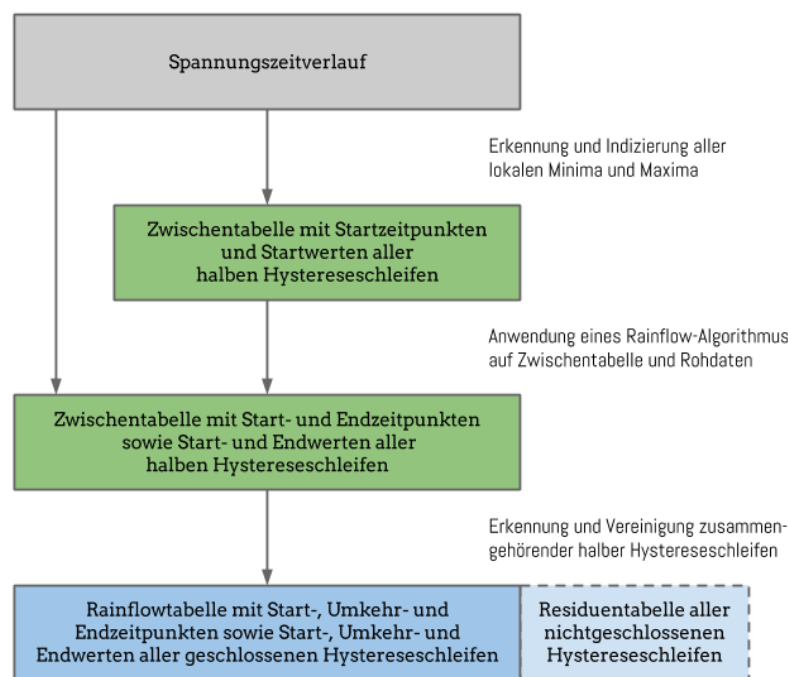


Bild 5.16: Konzept für ein erweitertes Rainflow-Verfahren

Hierfür wird die in Bild 5.16 gezeigte Abfolge vorgeschlagen, die im Detail folgende Schritte umfasst: Zunächst kann der zu analysierende, zeitdiskrete Spannungszeitverlauf σ_k vollständig erhalten bleiben und lediglich eine Erkennung und Indizierung aller lokalen Minima und Maxima vorgenommen werden. Lokale Extremstellen diskreter

Funktionen weisen einen Vorzeichenwechsel zwischen Rückwärtsdifferenz und Vorwärtsdifferenz auf. Sei

$$\Delta_k^r = \text{sgn}(\sigma_k - \sigma_{k-1}) \quad (5.22)$$

die Signumfunktion der Rückwärtsdifferenz,

$$\Delta_k^v = \text{sgn}(\sigma_{k+1} - \sigma_k) \quad (5.23)$$

die Signumfunktion der Vorwärtsdifferenz, seien die dadurch undefinierten Werte als

$$\Delta_1^r := -\Delta_1^v \quad \text{und} \quad \Delta_m^v := -\Delta_m^r \quad (5.24)$$

definiert und werde

$$\Delta_k^v := \Delta_{k+1}^v \quad \text{wenn} \quad \Delta_k^v = 0 \quad (5.25)$$

angewendet, um für den Sonderfall identischer Nachbarwerte eine vorausschauende Vorwärtsdifferenz zu nutzen, so gilt folglich für die Extremstellen

$$\mathcal{K}_{\text{Min}} = \{k \in \{1, \dots, m\} \mid \Delta_k^r - \Delta_k^v = -2\} \quad \text{und} \quad (5.26)$$

$$\mathcal{K}_{\text{Max}} = \{k \in \{1, \dots, m\} \mid \Delta_k^r - \Delta_k^v = +2\}. \quad (5.27)$$

Da die Anzahl der im Spannungssignal enthaltenen lokalen Maxima identisch mit der Anzahl enthaltener halber Hystereseschleifen in Druckrichtung und die um bis zu 1 abweichende Anzahl der im Spannungssignal enthaltenen lokalen Minima identisch mit der Anzahl enthaltener halber Hystereseschleifen in Zugrichtung ist,

$$n^Z = \#\mathcal{K}_{\text{Min}} \quad \text{und} \quad (5.28)$$

$$n^D = \#\mathcal{K}_{\text{Max}}, \quad (5.29)$$

kann nun der exakte Speicherplatz für zwei Zwischentabellen nach Tabelle 5.1 alloziert werden.

Diese **Zwischentabellen** sollen, getrennt nach Zug- und Druckseite, die nun bekannten Startzeitpunkte und Startspannungen sowie die noch zu ermittelnden Endzeitpunkte und Endspannungen aller im Signal enthaltenen halben Hystereseschleifen aufnehmen. Dabei ergeben sich in Zugrichtung die n^Z Startzeitpunkte $t_{\mathcal{K}_{\text{Min}}}$ und Startwerte $\sigma_{\mathcal{K}_{\text{Min}}}$, in Druckrichtung die n^D Startzeitpunkte $t_{\mathcal{K}_{\text{Max}}}$ und Startwerte $\sigma_{\mathcal{K}_{\text{Max}}}$.

Die Endzeitpunkte und Endspannungen der halben Hystereseschleifen können zunächst mit den entsprechenden Startwerten initialisiert werden – dies entspricht ihrer denkbaren Mindestausdehnung. Für die Ermittlung der tatsächlichen Endzeitpunkte und Endspannungen wird ein Rainflow-Algorithmus benötigt. Da dieser in Zug-

Tabelle 5.1: Rainflow-Verfahren ohne Informationsverlust, Zwischentabellen für die Erfassung halber Hystereseschleifen in Zugrichtung (links) und Druckrichtung (rechts)

#	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt	Startspannung	Endspannung	#	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt	Startspannung	Endspannung
1	t_1^s	t_1^e	σ_1^s	σ_1^e	1	t_1^s	t_1^e	σ_1^s	σ_1^e
2	t_2^s	t_2^e	σ_2^s	σ_2^e	2	t_2^s	t_2^e	σ_2^s	σ_2^e
n^Z	t_n^s	t_n^e	σ_n^s	σ_n^e	n^D	t_n^s	t_n^e	σ_n^s	σ_n^e

und Druckrichtung separat durchgeführt werden kann, soll die Beschreibung vereinfachend zunächst nur die Zugrichtung umfassen. Der Algorithmus soll sich an der in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen, ursprünglichen Formulierung des Rainflow-Algorithmus als Regenfluss-Analogie orientieren. Ohne seinen eigentlichen Ablauf zu verändern, soll er jedoch so versachlicht werden, dass keine Übersetzung und Rückübersetzung zwischen Werkstoffmechanik und Analogie erforderlich ist:

An jedem lokalen Spannungsminimum beginnt eine neue halbe Hystereseschleife in Zugrichtung, die nicht beendet ist und deren Endwerte sich auf die Zeitpunkte und Spannungswerte der jeweils nachfolgenden lokalen Spannungsmaxima erhöhen, solange

- (a) keine jüngere, noch nicht beendete halbe Hystereseschleife existiert, die eine geringere Startspannung aufweist als die eigene Startspannung und
- (b) keine ältere, noch nicht beendete halbe Hystereseschleife existiert, die eine geringere aktuelle Spannung aufweist als die eigene aktuelle Spannung.

Im Fall (a) bleiben demnach die zuvor eingetragenen Werte als Endzeitpunkt und Endspannung gültig. Im Fall (b) muss die Endspannung aus anderen Hystereseschleifen abgelesen und der Endzeitpunkt mit Hilfe des vollständigen Spannungszeitverlaufs ermittelt werden. Die Bedingungen (a) und (b) werden im Weiteren als Fortsetzungsbedingungen, ihre Negationen als Abbruchbedingungen bezeichnet. Im Folgenden soll dieser Algorithmus weiter formalisiert werden.

Die in der Zwischentabelle notierten halben Hystereseschleifen sollen nacheinander betrachtet und dabei so lange aktualisiert werden, bis sie ihre tatsächlichen Endwerte erreicht haben. Dazu wird eine Menge der zu aktualisierenden halben Hystereseschleifen

$$\mathcal{H} := \emptyset \quad (5.30)$$

erstellt – sie sei zu Beginn noch leer. Nun wird schrittweise für $i \in \{1, \dots, n^Z\}$ jede halbe Hystereseschleife der Zwischentabelle durch

$$\mathcal{H} := \mathcal{H} \cup \{i\} \quad (5.31)$$

geöffnet, das heißt der Menge der zu aktualisierenden halben Hystereseschleifen hinzugefügt. Zu jedem Schritt ist zunächst für die gesamte Menge mit

$$\mathcal{H} := \left\{ o \in \mathcal{H} \left| \bigvee_{\{p \in \mathcal{H} \mid p > o\}} \sigma_o^s > \sigma_p^s \right. \right\} \quad (5.32)$$

zu prüfen, ob die Fortsetzungsbedingung (a) erfüllt ist. Durch den sequenziellen Programmablauf können die Formeln 5.31 und 5.32 als

$$\mathcal{H} := \{o \in \mathcal{H} \mid \sigma_o^s > \sigma_i^s\} \cup \{i\} \quad (5.33)$$

zusammengefasst werden. Für die nun verbleibenden halben Hystereseschleifen ist die Fortsetzungsbedingung (b) zu prüfen. Hierzu wird erst die Teilmenge $\mathcal{G} \subset \mathcal{H}$ ermittelt, die die entsprechende Abbruchbedingung (b),

$$\mathcal{G} := \left\{ o \in \mathcal{H} \left| \bigvee_{\{p \in \mathcal{H} \mid p < o\}} \sigma_o^e > \sigma_p^e \right. \right\}, \quad (5.34)$$

erfüllt. Für alle halben Hystereseschleifen in \mathcal{G} sind Endspannungen und -zeitpunkte zu ermitteln. Dabei ergeben sich die Endspannungen

$$\sigma_{\mathcal{G}}^e = \min \sigma_{\mathcal{H}}^e \quad (5.35)$$

als Minimum der aktuellen Endspannungen der zu aktualisierenden halben Hystereseschleifen, während sich die Endzeitpunkte durch

$$t_{\mathcal{G}}^e = t_o \quad \text{mit } o := \left[\arg \min_{k \in [\cdot]} |\sigma^e - \sigma_k| \right] \quad (5.36)$$

ermitteln lassen.

In der Folge muss \mathcal{G} durch

$$\mathcal{H} := \mathcal{H} \setminus \mathcal{G} \quad (5.37)$$

aus der Menge der zu aktualisierenden halben Hystereseschleifen genommen werden. Vor dem nächsten Schritt i sind alle in der Menge \mathcal{H} verbliebenen Endwerte zu aktualisieren, das heißt

$$\sigma_{\mathcal{H}} = \sigma_i \quad \text{und} \quad (5.38)$$

$$t_{\mathcal{H}}^e = t_i^e \quad (5.39)$$

zu setzen.

Ist das Verfahren über alle Schritte i für die Zugseite (Z) beendet, muss es analog für die Druckseite (D) wiederholt werden. Formell und softwareseitig ist dies ohne weiteren Aufwand zu erreichen, indem unter Vorzeichendrehung der Ein- und Ausgangswerte identisch zur Zugseite verfahren wird.

Aus den beiden vervollständigten Zwischentabellen kann nun die eigentliche Ergebnistabelle geschlossener Hystereseschleifen abgeleitet werden. Zwei halbe Hystereseschleifen i und j bilden genau dann eine geschlossene Hystereseschleife, wenn

$$\underbrace{(\sigma_{Z,i}^S = \sigma_{D,j}^E) \wedge (\sigma_{Z,i}^E = \sigma_{D,j}^S)}_{\text{Unter- und Oberspannungen jeweils identisch}} \wedge \left(\underbrace{(t_{Z,i}^S = t_{D,j}^E)}_{\text{„hängende Hysterese“}} \vee \underbrace{(t_{Z,i}^E = t_{D,j}^S)}_{\text{„stehende Hysterese“}} \right) \quad (5.40)$$

gilt. Dieser Abgleich und die zeitliche Sortierung der Werte innerhalb der Hystereseschleife führen zu einer Tabelle entsprechend Tabelle 5.2 – sie sei im Folgenden **Rainflowtabelle** genannt.

Die verbleibenden Residuen, also nichtzugeordnete halbe Hystereseschleifen, sind durch die Differenzmenge aus zugeordneten halben Hystereseschleifen und der Gesamtmenge der halben Hystereseschleifen zu ermitteln. Je nach Herangehensweise können sie als separate Residuentabelle weitergeführt, in geschlossene Hystereseschleifen überführt oder aber vernachlässigt werden. Eine separate Residuentabelle besitzt die Form nach Tabelle 5.2 ohne die Spalten *Endzeitpunkt* und *Endspannung*. Um die Residuen konservativ zu berücksichtigen und als fiktive geschlossene Hystereseschleifen direkt in die Rainflowtabelle zu übernehmen, können die *Endzeitpunkte* als gleich den *Umkehrzeitpunkten* und die *Endspannungen* als gleich den *Startspannungen* definiert werden.

Tabelle 5.2: Rainflow-Verfahren ohne Informationsverlust, Rainflowtabelle für die Erfassung aller geschlossenen Hystereseschleifen eines Signals, Spalten 4 und 6 identisch.

#	Startzeitpunkt	Umkehrzeitpunkt	Endzeitpunkt	Startspannung	Umkehrspannung	Endspannung
1	t_1^s	t_1^p	t_1^e	σ_1^s	σ_1^p	σ_1^e
2	t_2^s	t_2^p	t_2^e	σ_2^s	σ_2^p	σ_2^e
n	t_n^s	t_n^p	t_n^e	σ_n^s	σ_n^p	σ_n^e

Zusammenfassend besitzt die neugeschaffene Rainflowtabelle folgende Eigenschaften:

- (1) Sie beschreibt jede einzelne Hystereseschleife als potenzielles Schädigungsereignis mit exaktem Zeitfenster und exaktem Spannungsbereich;
- (2) Sie beinhaltet keine Annahmen zur Relevanz der Schädigungsereignisse, das heißt ein unterer Schwellwert für die Spannungsamplitude kann noch beliebig festgelegt werden;
- (3) Sie beinhaltet keine Festlegung für eine Klassierung der Werte, auch diese kann bei Bedarf beliebig eingestellt werden;
- (4) Sie ist zeilenweise beliebig aufteilbar, wobei die Summe aller Teile dem Ganzen entspricht.

Das Aufstellen der Rainflowtabelle benötigt ohne weitere Rechenzeitorientierung etwa 30 s je 24 h Messdauer und belegt in etwa noch einmal den gleichen Speicherplatz wie die zugrunde liegenden Rohdaten. Damit ist beispielsweise auch eine durchgängige fünfjährige Langzeitmessung von 20 Dehnungsmessstellen in weniger als zwei Wochen auswertbar. Durch das in Abschnitt 2.3.3 gezeigte Zwischenspeicherverfahren muss das Aufstellen der Tabelle dabei nur ein einziges mal erfolgen. Insbesondere bei Langzeitmessungen bietet sich eine absolute Notation der Zeitpunkte an – mit Hilfe von 64-bit Werten können sie beispielsweise als Mikrosekunden seit dem Jahr 0 adressiert werden. Alle über eine Langzeitmessung an einer Messstelle erfassten Schädigungsereignisse können folglich in einer einzelnen Tabelle abgelegt werden.

Mit ihren messdauer- und signalabhängig etwa 10^6 bis 10^9 Zeilen ist die Tabelle zum einen noch immer handhabbar, zum anderen jedoch nicht mehr ohne weiteres darstellbar. Sie erfordert daher eine gezielte, im Folgenden beschriebene Auswertung, wobei der vollständig erhaltene Kontext der Messung genutzt werden kann.

5.4 Festigkeitsbewertung anhand der Rainflowtabelle

5.4.1 Rainflowmatrix

Obwohl sie für die weitere Verarbeitung nicht benötigt wird, stellt die Rainflowmatrix eine sinnvolle Visualisierung für die Interpretation der erfassten Hystereseschleifen dar. Um eine symmetrische Rainflowmatrix aus der Rainflowtabelle zu entwickeln, ist für eine frei wählbare geradzahlige Klassenanzahl a die Klassenbreite

$$w = \frac{2\hat{\sigma}}{a} \quad \text{mit} \quad \hat{\sigma} := \max_{i=1}^n \{|\sigma_i^s|, |\sigma_i^p|\} \quad (5.41)$$

zu ermitteln. Für die Spalten *Startspannung* und *Umkehrspannung* können nun durch Division die zugehörigen Klassen

$$X_i^s := \left\lceil \left\lfloor \frac{\sigma_i^s + \hat{\sigma}}{w} \right\rfloor \right\rceil \quad \text{und} \quad X_i^p := \left\lceil \left\lfloor \frac{\sigma_i^p + \hat{\sigma}}{w} \right\rfloor \right\rceil \quad (5.42)$$

berechnet werden. Die Rainflowmatrix $\mathbf{C} \in \mathbb{Z}^{a \times a}$ ergibt sich schließlich, indem für jedes Feld $C_{f,t}$ die Häufigkeit

$$C_{f,t} := \sum_{i=1}^n c_{i,f,t} \quad \text{mit} \quad c_{i,f,t} := \begin{cases} 1, & \text{wenn } (X_i^s = f) \wedge (X_i^p = t), \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases} \quad (5.43)$$

ermittelt wird. Die Rainflowmatrix kann als logarithmisch farbcodierter Plot dargestellt werden, ein Beispiel zeigt Bild 5.17.

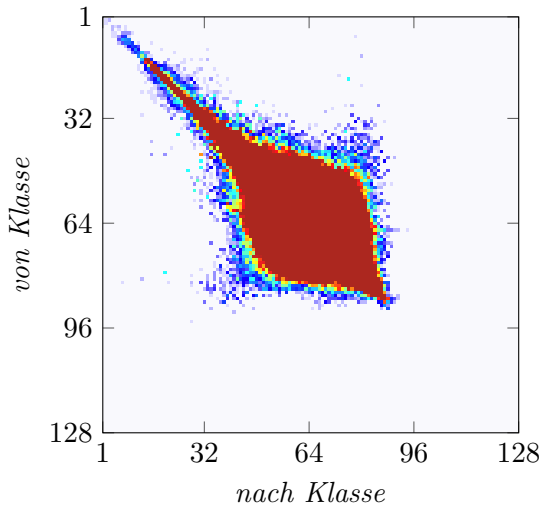


Bild 5.17: Rainflowmatrix, abgeleitet aus einer Rainflowtabelle mit $5 \cdot 10^8$ Hystereseschleifen

5.4.2 Beanspruchungskollektiv

Das Beanspruchungskollektiv wird bei herkömmlicher Auswertung aus der Rainflowmatrix gewonnen. Jedem Feld der Matrix kann mit Hilfe des HAIGH-Diagramms ein *Mittelspannungsfaktor* zugeordnet werden. Mit ihm erfolgt feldweise eine Umrechnung der tatsächlichen Spannungsamplitude auf eine mittelspannungsfreie, schädigungsäquivalente Spannungsamplitude. In der Folge können alle Zählwerte Feldern der mittelspannungsfreien Diagonalen zugeordnet werden. Mit anschließender Vernachlässigung der Hystereserichtung ergibt sich eine Darstellung der Stufenhäufigkeiten, die wie ein Histogramm die Häufigkeiten von Hystereseschleifen in einzelnen Spannungsclassen anzeigt. Durch Kumulation der Häufigkeiten entsteht daraus die gebräuchliche Darstellung der Summenhäufigkeit. Beides veranschaulicht Bild 5.18 im oberen Teil.

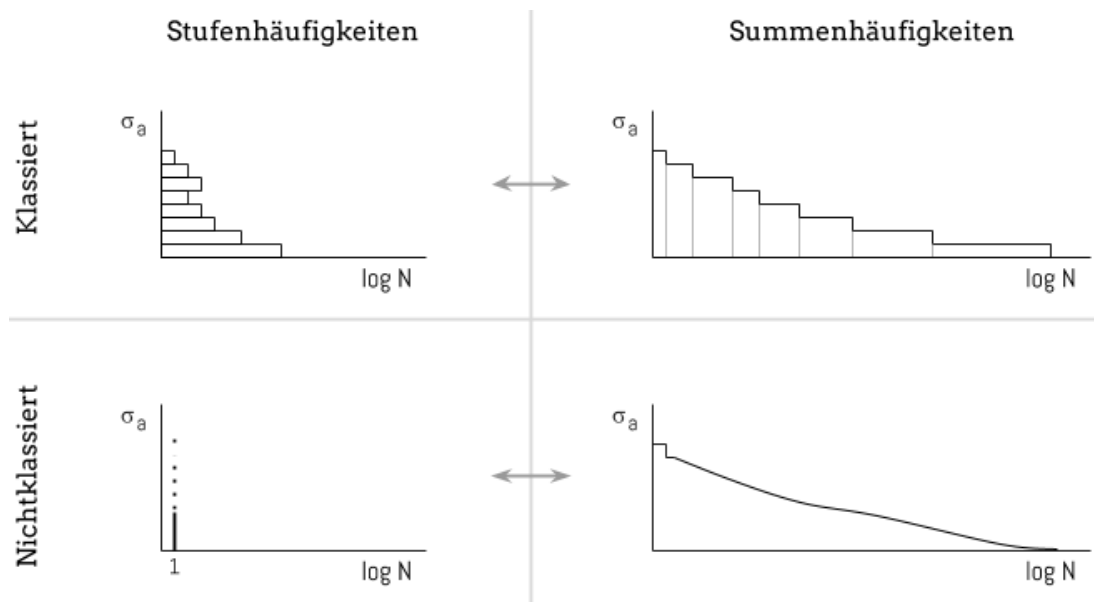


Bild 5.18: Darstellungsformen von Beanspruchungskollektiven in Abhängigkeit von Klassen- und Summenbildung

Aus der Rainflowtabelle können jedoch auch ohne Klassierung, das heißt auch ohne Umweg über die Rainflowmatrix, Beanspruchungskollektive gebildet werden. Dies veranschaulicht Bild 5.18 im unteren Teil. Während die Darstellung der nichtklassierten Stufenhäufigkeit keinen Nutzen darstellt, kann mit der nichtklassierten Summenhäufigkeit eine Darstellung des Beanspruchungskollektivs in gewohnter Form erreicht werden, das nur geringe Treppung aufweist und das die Genauigkeit des Rohsignals vollständig widerspiegelt.

Für die direkte Ermittlung dieser nichtklassierten Summenhäufigkeiten aus der Rainflowtabelle werden zunächst zusätzliche Spalten für Spannungsamplituden und Spannungsverhältnisse nach

$$\sigma_{a,i} = \frac{\sigma_i^o - \sigma_i^u}{2} \quad \text{und} \quad R_i = \frac{\sigma_i^u}{\sigma_i^o} \quad (5.44)$$

gebildet. Die Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren K_{AK} erfolgt zweckmäßig nach

$$K_{AK,i} := \begin{cases} \frac{1}{1 - M_\sigma}, & \text{wenn } R_i > 1, \\ \frac{1}{1 + M_\sigma(1 + R_i)(1 - R_i)^{-1}}, & \text{wenn } -\infty \leq R_i \leq 0, \\ \frac{3 + M_\sigma}{(1 + M_\sigma)(3 + M_\sigma(1 + R_i)(1 - R_i)^{-1})}, & \text{wenn } 0 < R_i < 0,5, \\ \frac{3 + M_\sigma}{3(1 + M_\sigma)^2}, & \text{wenn } 0,5 \leq R_i \leq 1. \end{cases} \quad (5.45)$$

Diese Formulierung folgt dem *Überlastfall F2* der FKM-Richtlinie [Fkm12]. Die Mittelspannungsempfindlichkeit M_σ muss dabei in Abhängigkeit von Werkstoffgruppe und Eigenspannung für das jeweilige Bauteil festgelegt werden. Durch Multiplikation der Spannungsamplituden mit den Mittelspannungsfaktoren werden in einer weiteren Spalte die mittelspannungsfreien Spannungsamplituden, die *Wechselspannungsamplituden*

$$\sigma_{aW,i} = K_{AK,i} \cdot \sigma_{a,i} \quad (5.46)$$

berechnet. Die vergrößerte Rainflowtabelle zeigt Tabelle 5.3.

Tabelle 5.3: Rainflow-Verfahren ohne Informationsverlust, Ergänzung der Rainflowtabelle um Auswertungsspalten

#	Startzeitpunkt	Umkehrzeitpunkt	Endzeitpunkt	Startspannung	Umkehrspannung	Endspannung	Oberspannung	Unterspannung	Spannungsspannung	Spannungsamplitude	Spannungsverhältnis	Wechselspannungsamplitude
1	t_1^s	t_1^p	t_1^e	σ_1^s	σ_1^p	σ_1^e	σ_1^o	σ_1^u	σ_1^a	R_1	σ_1^{aW}	
2	t_2^s	t_2^p	t_2^e	σ_2^s	σ_2^p	σ_2^e	σ_2^o	σ_2^u	σ_2^a	R_2	σ_2^{aW}	
n	t_n^s	t_n^p	t_n^e	σ_n^s	σ_n^p	σ_n^e	σ_n^o	σ_n^u	σ_n^a	R_n	σ_n^{aW}	

Wird die Tabelle nun zeilenweise nach der Spalte der Wechsellastamplituden absteigend sortiert, sodass

$$\sigma_{aW,i} \stackrel{!}{\geq} \sigma_{aW,i+1} \quad \text{für alle } i \in \{1, \dots, j-1\} \quad (5.47)$$

gilt, entspricht die zugehörige Summenhäufigkeit schlicht

$$N_i = f_{\text{erw}} \cdot i \quad \text{für alle } i \in \{1, \dots, j\}. \quad (5.48)$$

Dabei dient f_{erw} als Erweiterungsfaktor, um den Umfang des ermittelten Beanspruchungskollektivs linear auf die Nutzungsdauer oder die Gesamtleistung zu erweitern. Bild 5.19 zeigt Beanspruchungskollektive, die nach unterschiedlichen Laufleistungen aus der Rainflowtabelle einer Langzeitmessung gewonnen wurden und auf eine gleiche, angenommene Gesamtleistung erweitert wurden.

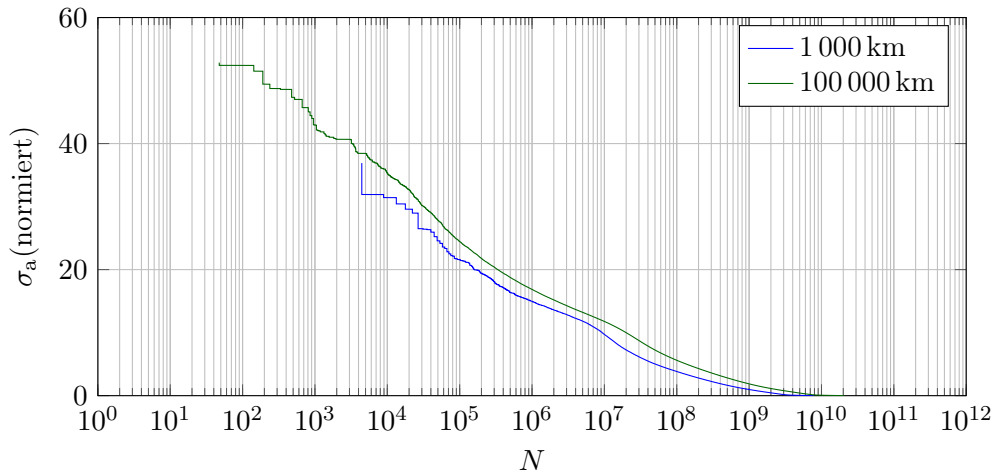


Bild 5.19: Nichtklassierte Beanspruchungskollektive an einer Dehnungsmessstelle am Wagenkasten, Entwicklung mit steigender Fahrstrecke, jeweils erweitert auf $3 \cdot 10^6$ km

5.4.3 Äquivalentamplitude und Auslastungsgrad

Die Bestimmung der Strukturfestigkeit erfolgt prinzipiell durch einen Vergleich des Beanspruchungskollektivs und der Beanspruchbarkeit, welche für ein Einstufenkollektiv (auch *Rechteckkollektiv*) durch die Bauteil-Wöhlerlinie beschrieben wird. Äquivalentamplitude und N_D beschreiben zusammen ein solches Rechteckkollektiv, das den gleichen Schädigungseintrag wie das ausgewertete vielstufige Beanspruchungskollektiv aufweist. Dies veranschaulicht Bild 5.20. Der Ermittlung der Äquivalentamplitude liegt eine Gegenüberstellung der Stufenhäufigkeiten mit der Bauteil-Wöhlerlinie zu Grunde. Eine

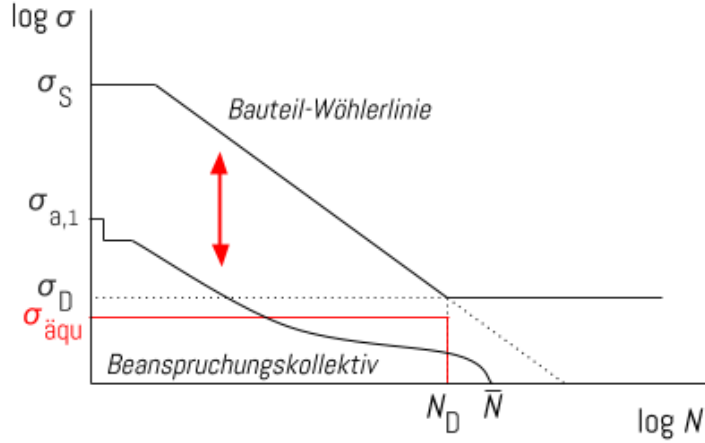


Bild 5.20: Auswertungsrichtung bei Nutzung der Äquivalentamplitude

Fragestellung auf dem Feld der Betriebsfestigkeit ist, gegen welche Werte Spannungen unter der Dauerfestigkeitsgrenze zu vergleichen sind.

Die Nutzung der unveränderten Wöhlerlinie (MINER *original*) gilt als unsicher, da ein Schädigungseinfluss kleiner Spannungsamplituden ($\sigma_a < \sigma_D$) vollständig vernachlässigt wird. Dieser ist jedoch anzunehmen, wenn das Bauteil gleichzeitig auch durch höhere Spannungsamplituden im Bereich der Zeitfestigkeit beansprucht wird. Der Vergleich des Beanspruchungskollektivs gegen einen bis zum Nulldurchgang verlängerten Zeitfestigkeitsabschnitt der Wöhlerlinie (MINER *elementar*) ist hingegen zu konservativ, wenn eine optimale Festigkeitsauslegung angestrebt wird. Aus diesem Grund existieren verschiedene Zwischenformen, bei denen die Wöhlerlinie in diesem Bereich abgesenkt wird. Hervorzuheben ist hierbei das Verfahren MINER *konsequent*, bei dem diese Absenkung in Abhängigkeit der Äquivalentamplitude erfolgt und diese zugleich verändert.

Um die Äquivalentamplitude konservativ nach MINER *elementar* zu berechnen, kann der FKM-Richtlinie folgend mit

$$A_{\text{ele}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^j \frac{n_i}{\bar{N}} \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_{a,1}} \right)^k} \quad (5.49)$$

der Abstand A_{ele} zwischen Wöhlerlinie und *Lebensdauerlinie* bestimmt werden. Die *Lebensdauerlinie* entspricht dabei der Wöhlerlinie, wenn für gleiche Kollektivformen ein Rechteckkollektiv mit $\sigma_{a,1}$ und N_D angesetzt wird. Die Äquivalentspannung ergibt sich nach

$$\sigma_{\text{äqu,ele}} = \frac{\sigma_{a,1}}{\sqrt[k]{A_{\text{ele}} \cdot N_D \cdot D_m}} \quad (5.50)$$

mit der *effektiven Miner-Summe* D_m . Um die Äquivalentsspannung aus dem nichtklassierten Kollektiv zu gewinnen, lassen sich Formel 5.49 und Formel 5.50 zu

$$\sigma_{\ddot{a}qu,ele} = \sqrt[k]{\frac{\sum_{i=1}^j (\sigma_{a,i})^k}{N_D D_m}} \quad (5.51)$$

zusammenfassen und vereinfachen.

Wird nach MINER *konsequent* verfahren, kann zunächst nur eine näherungsweise Schwingenspielzahl \tilde{N} ermittelt werden, indem Formel 5.51 zu

$$\tilde{N} = A_{kon} \cdot N_D \cdot D_m \cdot \left(\frac{\tilde{\sigma}_{\ddot{a}qu}}{\sigma_{a,1}} \right)^k \quad (5.52)$$

umgestellt und ein Schätzwert für die Äquivalentamplitude $\tilde{\sigma}_{\ddot{a}qu}$ genutzt wird. Der hierfür benötigte Abstand zwischen Wöhler- und Lebensdauerkenlinie ergibt sich nach

$$A_{kon} = \left[\frac{\left(\frac{\tilde{\sigma}_{\ddot{a}qu}}{\sigma_{a,1}} \right)^{k-1} - \left(\frac{\sigma_{a,m}}{\sigma_{a,1}} \right)^{k-1}}{\sum_{i=1}^{m-1} \frac{n_i}{\tilde{N}} \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_{a,1}} \right)^k} + \sum_{\nu=m}^j \frac{\left(\frac{\sigma_{a,\nu}}{\sigma_{a,1}} \right)^{k-1} - \left(\frac{\sigma_{a,\nu+1}}{\sigma_{a,1}} \right)^{k-1}}{\sum_{i=1}^{\nu} \frac{n_i}{\tilde{N}} \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_{a,1}} \right)^k} \right] \cdot \left(\frac{\sigma_{a,1}}{\tilde{\sigma}_{\ddot{a}qu}} \right)^{k-1} \quad (5.53)$$

Durch den Verzicht auf Klassierung vereinfacht sich diese Formel bei Nutzung der Rainflowtabelle zu

$$A_{kon} = j \cdot \left[\frac{\left(\frac{\tilde{\sigma}_{\ddot{a}qu}}{\sigma_{a,1}} \right)^{k-1} - \left(\frac{\sigma_{a,m}}{\sigma_{a,1}} \right)^{k-1}}{\sum_{i=1}^{m-1} \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_{a,1}} \right)^k} + \sum_{\nu=m}^j \frac{\left(\frac{\sigma_{a,\nu}}{\sigma_{a,1}} \right)^{k-1} - \left(\frac{\sigma_{a,\nu+1}}{\sigma_{a,1}} \right)^{k-1}}{\sum_{i=1}^{\nu} \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_{a,1}} \right)^k} \right] \cdot \left(\frac{\sigma_{a,1}}{\tilde{\sigma}_{\ddot{a}qu}} \right)^{k-1} \quad (5.54)$$

Die Formeln 5.54 und 5.52 sind entsprechend der FKM-Richtlinie „iterativ mit unterschiedlichen Werten $\tilde{\sigma}_{\ddot{a}qu}$ zu wiederholen, bis sich ein Wert \tilde{N} entsprechend der geforderten Zyklenzahl \bar{N} ergibt.“ Die Richtlinie schlägt hierfür kein konkretes Iterationsverfahren vor. Da a priori mit $\hat{\sigma}_{\ddot{a}qu,kon} = \sigma_{\ddot{a}qu,ele}$ eine obere Schranke und mit $\tilde{\sigma}_{\ddot{a}qu,kon} = 0$ eine untere Schranke für $\sigma_{\ddot{a}qu,kon}$ bekannt ist, und da

$$\sigma_{\ddot{a}qu,kon} < \tilde{\sigma}_{\ddot{a}qu} \quad \Leftrightarrow \quad \bar{N} < \tilde{N} \quad \text{und} \quad (5.55)$$

$$\sigma_{\ddot{a}qu,kon} > \tilde{\sigma}_{\ddot{a}qu} \quad \Leftrightarrow \quad \bar{N} > \tilde{N} \quad (5.56)$$

gelten, kann jedoch zum Beispiel ein Halbierungsverfahren genutzt werden, das den ersten und jeden weiteren Iterationsschritt, das heißt jede Berechnung von \tilde{N} nach

Formel 5.52, mit dem Näherungswert

$$\tilde{\sigma}_{\text{äqu}} := \frac{\hat{\sigma}_{\text{äqu,kon}} + \check{\sigma}_{\text{äqu,kon}}}{2} \quad (5.57)$$

durchführt und für den Folgeschritt

$$\hat{\sigma}_{\text{äqu,kon}} := \tilde{\sigma}_{\text{äqu}}, \quad \text{wenn } \tilde{N} > \bar{N}, \quad (5.58)$$

$$\check{\sigma}_{\text{äqu,kon}} := \tilde{\sigma}_{\text{äqu}}, \quad \text{wenn } \tilde{N} \leq \bar{N}, \quad (5.59)$$

setzt, bis der maximale Fehler

$$\Delta\sigma_{\text{äqu,kon}} = \hat{\sigma}_{\text{äqu,kon}} - \check{\sigma}_{\text{äqu,kon}} \quad (5.60)$$

eine zu definierende Toleranz, zum Beispiel 10^{-5} MPa, unterschreitet. Diese Genauigkeit wird nach maximal 26 Iterationsschritten erreicht.

Die Äquivalentamplitude zeigt, welche ertragbaren Spannungen konstruktiv realisiert werden müssen, um eine bestimmte Bauteillebensdauer sicherzustellen. Durch die Gegenüberstellung von Äquivalentspannung $\sigma_{\text{äqu}}$ mit der ertragbaren Strukturspannung σ_{ertr} kann unter Berücksichtigung des Gesamtsicherheitsfaktors j_D nach

$$a_{\text{BK}} = \frac{\sigma_{\text{äqu}}}{\sigma_{\text{ertr}}} \cdot j_D \quad (5.61)$$

der Auslastungsgrad a_{BK} ermittelt werden.

Oft sind konstruktive Maßnahmen aber nicht die erste Wahl – zum Beispiel wenn sie im Konflikt mit Zielen wie einem geringen Fahrzeuggewicht stehen, wenn sie große technische Eingriffe in weitere Baugruppen erfordern oder wenn sie zu hohen wirtschaftlichen Lasten führen. In diesen Fällen müssen die Ursachen gefunden werden, die zu einer hohen Bauteilauslastung führen. Hierfür ist zunächst eine Beschreibung der Beanspruchung über die Schädigungssumme dienlich.

5.4.4 Schädigungssumme

Die Schädigungssumme wird herkömmlich aus den Stufenhäufigkeiten des klassierten Beanspruchungskollektivs gewonnen, indem die jeweilige Häufigkeit n_i in ein Verhältnis zur ertragbaren Häufigkeit gemäß der Wöhlerlinie gesetzt wird. Diese Auswertungsrichtung veranschaulicht Bild 5.21. Die resultierenden Teilschädigungen können nach der Hypothese der linearen Schadensakkumulation zur Schädigungssumme

$$D_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i} \quad (5.62)$$

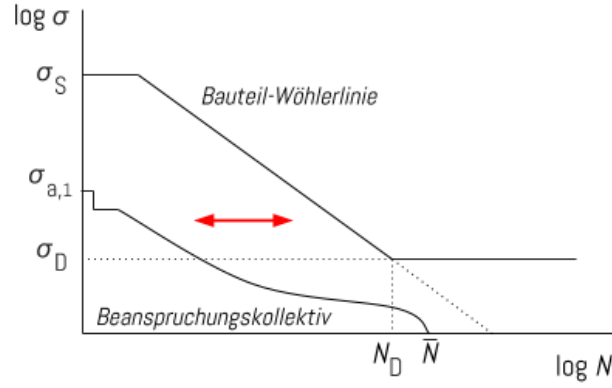


Bild 5.21: Auswertungsrichtung bei Nutzung der Schädigungssumme

addiert werden. Hypothetisch, das heißt unter anderem ohne Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren, entspricht eine Schädigungssumme von $D \geq 1$ dabei dem Bauteilversagen.

Der Berechnung liegt dabei folglich die vollständige, bauteilspezifische Wöhlerlinie zugrunde. Auch daran liegt es, dass anhand der Schädigungssumme im Gegensatz zu Äquivalentamplitude und Auslastungsgrad keine direkten konstruktiven Maßnahmen getroffen werden können, wie zum Beispiel die Wahl einer anderen Schweißnahtausführung. Während Äquivalentamplitude und Auslastungsgrad proportional zur Beanspruchung und zur ertragbaren Beanspruchung sind, jedoch nichtproportional zur Lastspielzahl, ist die Schädigungssumme zwar nichtproportional zu Beanspruchung und zu ertragbarer Beanspruchung, dafür jedoch proportional zur Lastspielzahl.

Im Gegensatz zu Äquivalentamplitude und Auslastungsgrad, die prinzipiell nur für die gesamte Rainflowtabelle oder größere Teile von ihr aufgestellt werden können, lässt sich die Schädigungssumme daher für jedes Einzelereignis bestimmen. Die Rainflowtabelle erweitert sich folglich um die Spalte

$$D_i = \frac{1}{N_i} \quad \text{mit } N_i = N_D \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_D} \right)^{-k} \quad (5.63)$$

und nimmt damit die Struktur von Tabelle 5.4 an. Dabei gilt nach der Hypothese der linearen Schadensakkumulation für die Gesamtschädigungssumme noch immer

$$D_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^j D_i. \quad (5.64)$$

Durch diese Eigenschaft ist die Schädigungssumme für eine kontextbezogene Auswertung besonders geeignet, wie im Folgenden gezeigt wird.

Tabelle 5.4: Rainflow-Verfahren ohne Informationsverlust, Ergänzung der Rainflowtabelle um Auswertungsspalten

#	Startzeitpunkt	Umkehrzeitpunkt	Endzeitpunkt	Startspannung	Umkehrspannung	Endspannung	[...]	Wechselspannungsamplitude	Schädigungssumme
1	t_1^s	t_1^p	t_1^e	σ_1^s	σ_1^p	σ_1^e	.	σ_1^{aW}	D_1
2	t_2^s	t_2^p	t_2^e	σ_2^s	σ_2^p	σ_2^e	.	σ_2^{aW}	D_2
n	t_n^s	t_n^p	t_n^e	σ_n^s	σ_n^p	σ_n^e	.	σ_n^{aW}	D_n
								$\sigma_{\text{äqu}}$	D_{ges}

5.4.5 Kontextbezogene Auswertung

Anhand der absoluten Zeitstempel ist es möglich, jedem Eintrag der Rainflowtabelle – also jedem einzelnen Lastspiel – weitere Zusatzgrößen zuzuordnen. Dabei kann es sich erstens um Größen aus der Fahrzeugmessung handeln, zum Beispiel GPS-Ort, Fahrgeschwindigkeit, Beschleunigungen oder Federwege. Zweitens können Größen der synchronisierten Gleislage eingetragen werden. Drittens können auch Eigenschaften hinzugefügt werden, die aus der Rainflowtabelle selbst entwickelt werden, wie zum Beispiel die Dauer $t_i^e - t_i^s$ der einzelnen Hystereseschleifen. Die Form einer solchen, um Zusatzspalten ergänzten Rainflowtabelle zeigt Tabelle 5.5.

Tabelle 5.5: Rainflow-Verfahren ohne Informationsverlust, Ergänzung der Rainflowtabelle um Zusatzdaten für die spätere Aufteilung

#	Startzeitpunkt	Umkehrzeitpunkt	Endzeitpunkt	Startspannung	Umkehrspannung	Endspannung	[...]	Wechselspannungsamplitude	Schädigungssumme	Zusatzgröße 1	Zusatzgröße m
1	t_1^s	t_1^p	t_1^e	σ_1^s	σ_1^p	σ_1^e	.	σ_1^{aW}	D_1	$\bullet_{1,1}$	$\bullet_{1,m}$
2	t_2^s	t_2^p	t_2^e	σ_2^s	σ_2^p	σ_2^e	.	σ_2^{aW}	D_2	$\bullet_{2,1}$	$\bullet_{2,m}$
n	t_n^s	t_n^p	t_n^e	σ_n^s	σ_n^p	σ_n^e	.	σ_n^{aW}	D_n	$\bullet_{n,1}$	$\bullet_{n,m}$
								$\sigma_{\text{äqu}}$	D_{ges}		

Anschließend kann eine Klassierung dieser Zusatzdaten vorgenommen und die Rainflowtabelle, wie bereits in Bild 5.15b skizziert, in Teiltabellen entsprechend dieser Klas-

sen aufgetrennt werden. Durch die Summation aller Einzelschädigungen jeder Teiltabelle zu Teilschädigungssummen lässt sich der Zusammenhang zwischen der Zusatzgröße und der resultierenden anteiligen Fahrzeugbeanspruchung herstellen.

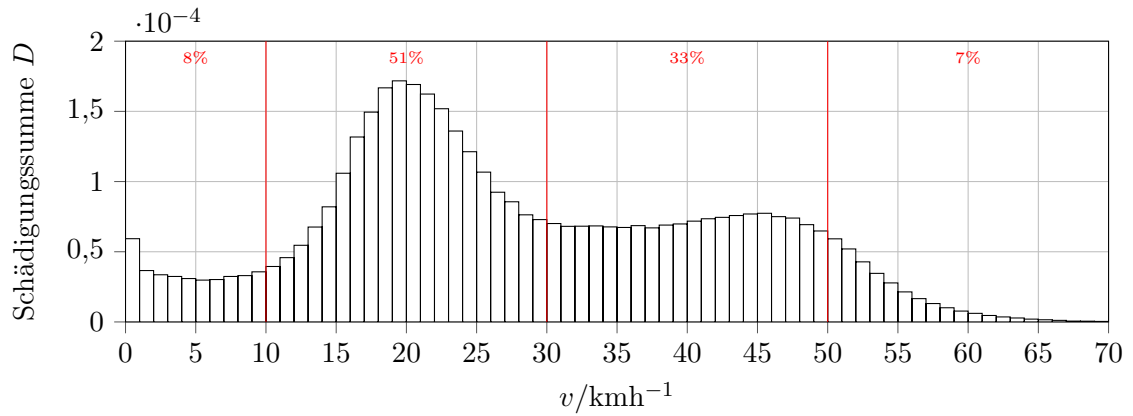
Bild 5.22a zeigt als Beispiel eine nach diesem Verfahren durchgeführte Auswertung einer Dehnungsmessstelle nach der Fahrgeschwindigkeit. Dabei wird die Fahrgeschwindigkeit für jedes Lastspiel ermittelt und als Spalte der Rainflowtabelle hinzugefügt. Nach Klassierung der Geschwindigkeit mit einer Klassenbreite von 1 km/h lässt sich jede Tabellenzeile einer von 70 neuen Teiltabellen zuordnen. Jeder Balken im Diagramm zeigt die Schädigungssummen einer Teiltabelle, die Summe aller Balken entspricht exakt der Gesamtschädigungssumme.

Der Darstellung ist zu entnehmen, dass mehr als die Hälfte der Fahrzeugbeanspruchung im Bereich von 10 km/h bis 30 km/h stattfindet, einer häufigen Fahrgeschwindigkeit und einer typischen Fahrgeschwindigkeit für Bögen, Weichen und Kreuzungen. Ein Drittel der Beanspruchung fällt auf den Geschwindigkeitsbereich von 30 km/h bis 50 km/h. Das Fahren unter 10 km/h und über 50 km/h trägt mit zusammen 15% der Beanspruchung nur wenig zur Gesamtbeanspruchung bei, entsprechend gering ist das Optimierungspotenzial für diese Bereiche.

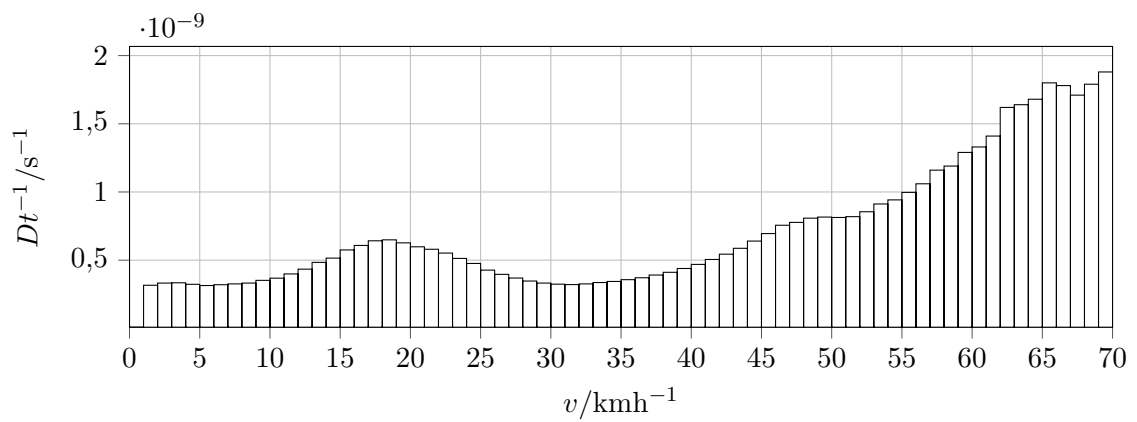
Durch Division der Teilschädigungssummen mit den in der Analyse des Betriebsspiegels festgestellten Einsatzhäufigkeiten (Bild 5.10) werden jene Einflussfaktoren deutlich, die einen überproportional hohen Anteil an der Fahrzeugbeanspruchung aufweisen, wie es Bild 5.22b zeigt. Hier wird ersichtlich, dass die Beanspruchung bei hoher Geschwindigkeit durchaus zunimmt, hohe Geschwindigkeiten also nur aufgrund ihrer geringen Häufigkeit wenig Relevanz für die Gesamtbeanspruchung haben.

Für die Häufigkeit nach Bild 5.10 ist dabei die Verweildauer im Geschwindigkeitsband maßgeblich. Aus Sicht des Betreibers zählt jedoch nicht die verbrachte Zeit, sondern die zurückgelegte Strecke. Daher ist auch eine Normierung auf den im jeweiligen Geschwindigkeitsband zurückgelegten Weg sinnvoll, das Ergebnis zeigt Bild 5.22c.

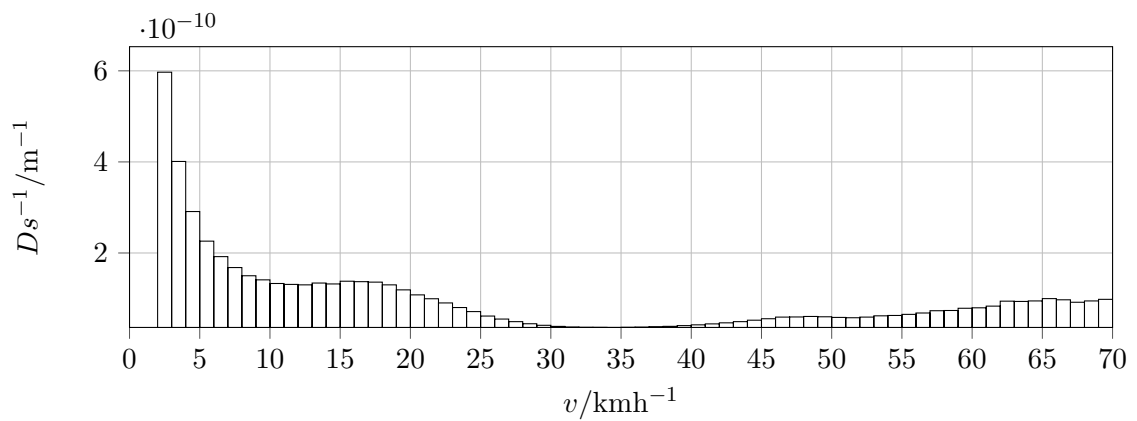
Nun ist sichtbar, dass die Beanspruchung bis 30 km/h immer weiter abnimmt, vermutlich wegen steigender Gleisqualität sowie dem Entfall von Bogen- und Kreuzungsfahrt. Ab 40 km/h nimmt die Beanspruchung wieder langsam zu, vermutlich wegen höherer Lasten aus der Laufdynamik. Während die Beanspruchung im ersten Bereich wohl nur durch Änderung der Infrastruktur zu reduzieren wäre, ließe sie sich im zweiten Bereich demnach durch eine niedrigere Geschwindigkeit reduzieren. Da das Diagramm die Fahrzeugbeanspruchung nicht nur indikativ, sondern auch quantitativ beschreibt, ist eine Kostenoptimierung für Fahrzeugauslegung und -betrieb auf Basis dieser Untersuchungsmethode denkbar.



(a) Schädigungssumme aufgeteilt nach der Fahrgeschwindigkeit in 70 Klassen der Breite 1 km/h



(b) Wie a), normiert auf die im jeweiligen Geschwindigkeitsband verweilte Zeit



(c) wie a), normiert auf die im jeweiligen Geschwindigkeitsband zurückgelegte Strecke

Bild 5.22: Geschwindigkeitsbezogene Auswertung der Schädigungssumme, basierend auf $16 \cdot 10^6$ Messsekunden und $72,3 \cdot 10^6$ Lastereignissen

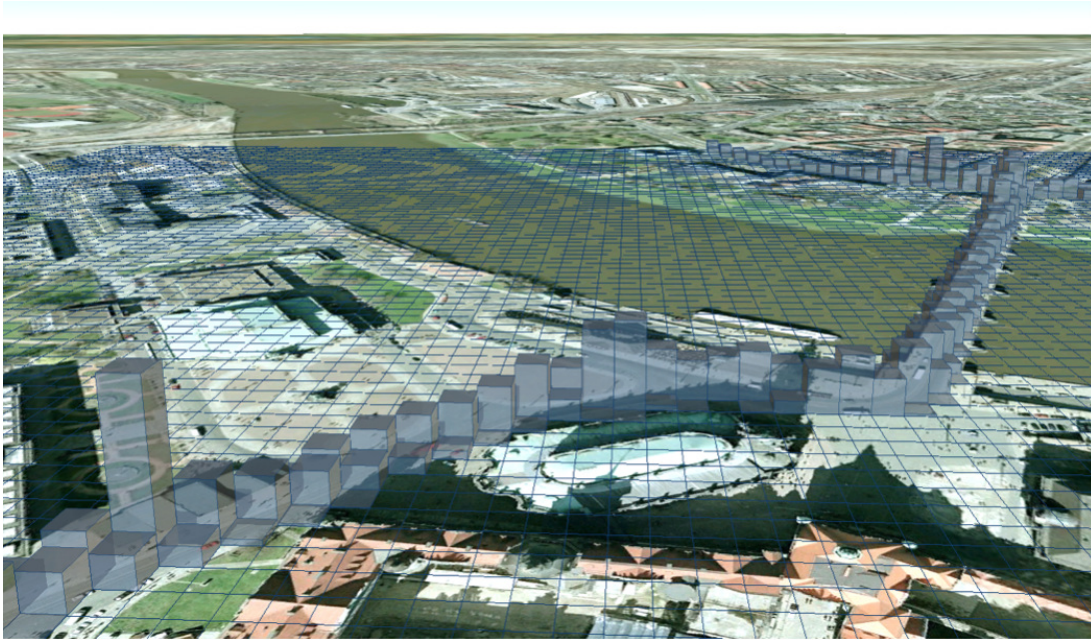


Bild 5.23: Schädigungssumme aufgeteilt nach Flächen zu je 10 m x 10 m

Neben solchen einparametrischen Untersuchungen sind auch **mehrparametrische Aufteilungen** möglich. So stellt Bild 5.23 die Beanspruchung im Bezug zu Längengrad und Breitengrad jenes Orts dar, an dem sich das Fahrzeug zum zeitlichen Mittelpunkt jedes Lastspiels befand. Nachteile dieser Darstellung sind erstens die geringe Ortsauflösung, die zum Beispiel keine Unterscheidung der Richtungseise zulässt, und zweitens die schlechte Vergleichbarkeit der Flächen durch die Eigenschaft, dass gleich große Flächen ungleich lange Gleisabschnitte repräsentieren.

Die Nutzung der in Abschnitt 2.5.2 beschriebenen Gleiszuordnung von Messungen zu einem bekannten Gleisnetz erlaubt Darstellungen wie Bild 5.24, die diese beiden Nachteile nicht aufweisen. Im Beispiel sind $72,3 \cdot 10^6$ Lastereignisse einer Dehnungsmessstelle am Wagenkasten auf $978 \cdot 10^3$ befahrene Gleisabschnitte der Länge 0,25 m verteilt und die Schädigungssumme für jeden Abschnitt kumuliert. In der Regel erstrecken sich Lastspiele über mehrere benachbarte Gleisabschnitte. Bei diesen wird die Beanspruchung des Lastspiels gleichmäßig auf die Gleisabschnitte aufgeteilt. Auch diese Darstellung ist nicht rein qualitativ, die zugrundeliegenden Tabellen erlauben auch eine Quantifizierung der Beanspruchung nach Streckenabschnitten und Fahrtlinien, nach Kreuzungsbereichen und für jede Weiche im Gleisnetz.

Eine Unterteilung nach weiteren Parametern wie Zeit, Geschwindigkeit oder Umgebungstemperatur kann erfolgen und ermöglicht es zum Beispiel, die Beanspruchung des Fahrzeugs an einer bestimmten Kreuzung in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit aus-

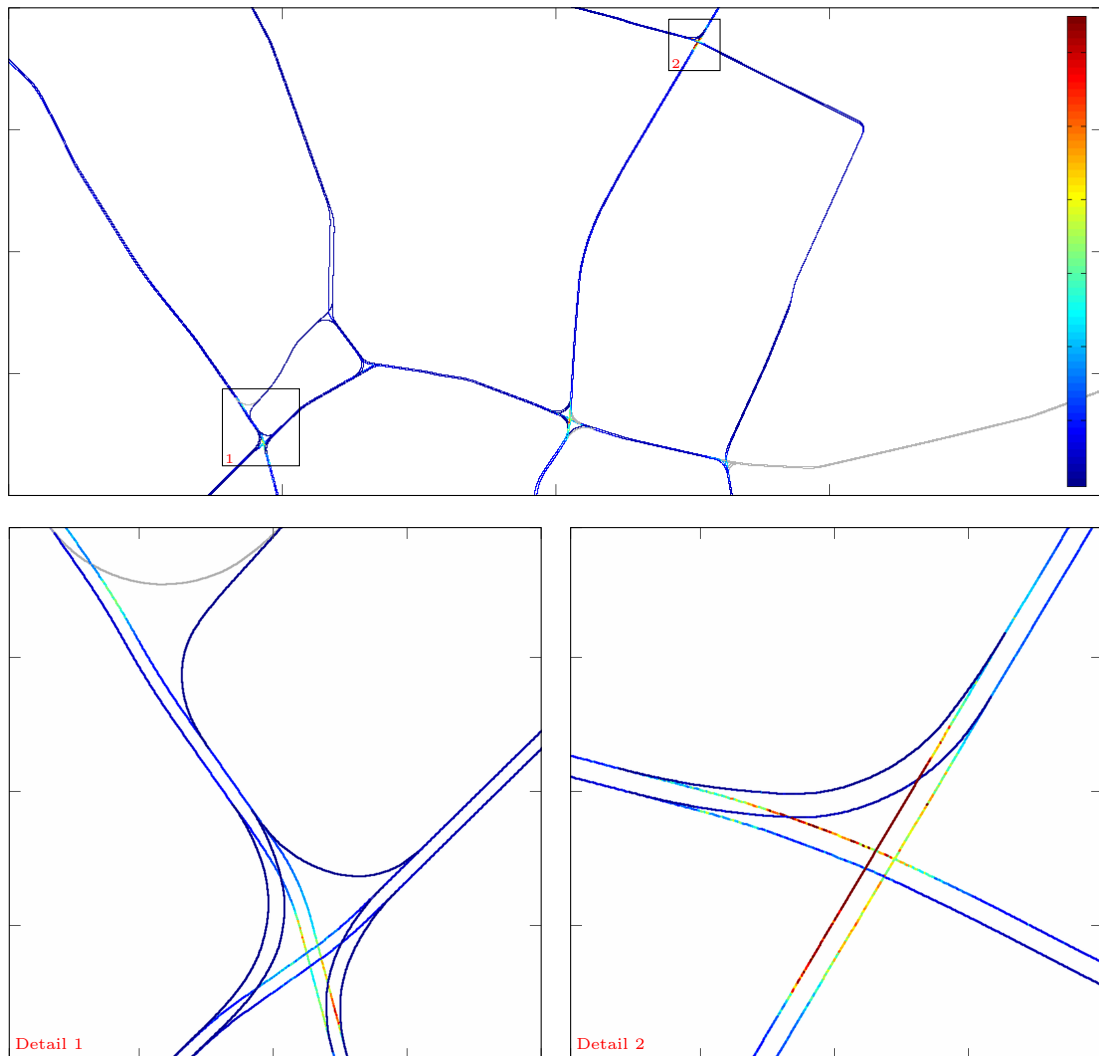


Bild 5.24: Farbcodierte Schädigungssumme aufgeteilt nach Gleisabschnitten der Länge 0,25 m, normiert auf $1,04 \cdot 10^{-8}$, Ausschnitt und Details eines Gesamtnetzes

zuwerten. Die Möglichkeit, jedes einzelne Lastspiel eines Bauteils über lange Zeiträume zu erfassen und die winzige Bauteilbeanspruchung dieses Lastspiels einem oder mehreren Einflussfaktoren zuordnen zu können, ermöglicht so auch einen tiefen Einblick in die Gesamtbeanspruchung und deren Ursachen. Mit dem Verständnis der Ursachen können diese zum einen gezielt reduziert werden. Zum anderen können kritische Lastfälle besser erkannt und in der Fahrzeugauslegung berücksichtigt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Die Nutzung historisch solider Lastannahmen, wie sie zum Beispiel die VDV Richtlinie 152 in der Fassung von 1992 beschreibt, ist für die Festigkeitsauslegung neuartiger Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge unzureichend, da die Annahmen und Methoden der Komplexität und insbesondere der Nichtlinearität moderner Fahrzeugkonzepte keine Rechnung tragen. Diese Arbeit zeigt auf, wie sich entstandene Lücken in den Lastannahmen durch Simulation und Messung von Fahrzeug und Gleis analysieren, verstehen und schließen lassen.

Den Kern bildet dabei der Einsatz detaillierterer Simulationsmodelle von Fahrzeug und Gleis, deren Eingangsdaten mit Hilfe von Messungen gewonnen und deren Ausgangsdaten mit ihnen verifiziert und ergänzt werden müssen. Hierfür wurde ein ganze Reihe an Methoden entwickelt und in Werkzeuge umgesetzt. Diese bilden ein vielseitiges Baukastensystem für die Fahrzeuganalyse, Modellvalidierung und Datenbewertung zur Erlangung sicherer Lastannahmen für die Fahrzeugauslegung.

Eine Übersicht über diese Methoden bietet Bild 6.1, das die Inhalte der Arbeit kapitelweise gegliedert grafisch darstellt. Pfeile kennzeichnen Verknüpfungen (grau) und Datenfluss (grün) zwischen den einzelnen Unterkapiteln. Themen, deren Ausarbeitungen einen besonderen Neuheitswert aufweisen, sind fett gesetzt. Die einzelnen Kapitel der Arbeit werden im folgenden zusammengefasst.

6.1.1 Messung

Die Arbeit widmet sich zunächst klassischen und neuartigen Messmethoden zur Kurz- und Langzeitmessung von Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen. Ein wesentlicher erster Schritt für die Verbesserung von Lastannahmen besteht in der Ausweitung und Optimierung von Fahrzeug- und Gleismessungen. Für die Verarbeitung von Langzeitmessungen wird ein zielgerichteter neuer Auswertungsprozess vorgestellt, der auf einer automatischen Zwischenergebnisverwaltung beruht und der im Rahmen der Arbeit umgesetzt und erprobt wurde. Gleisseitig wird ein automatisiertes Verfahren aufgestellt, um die vielfältigen, meist als Inselnetz errichteten Infrastrukturen in einheitlichen Gleisdatenbanken zu beschreiben. Für die Datenstruktur stellt sich eine strenge Segmentierung

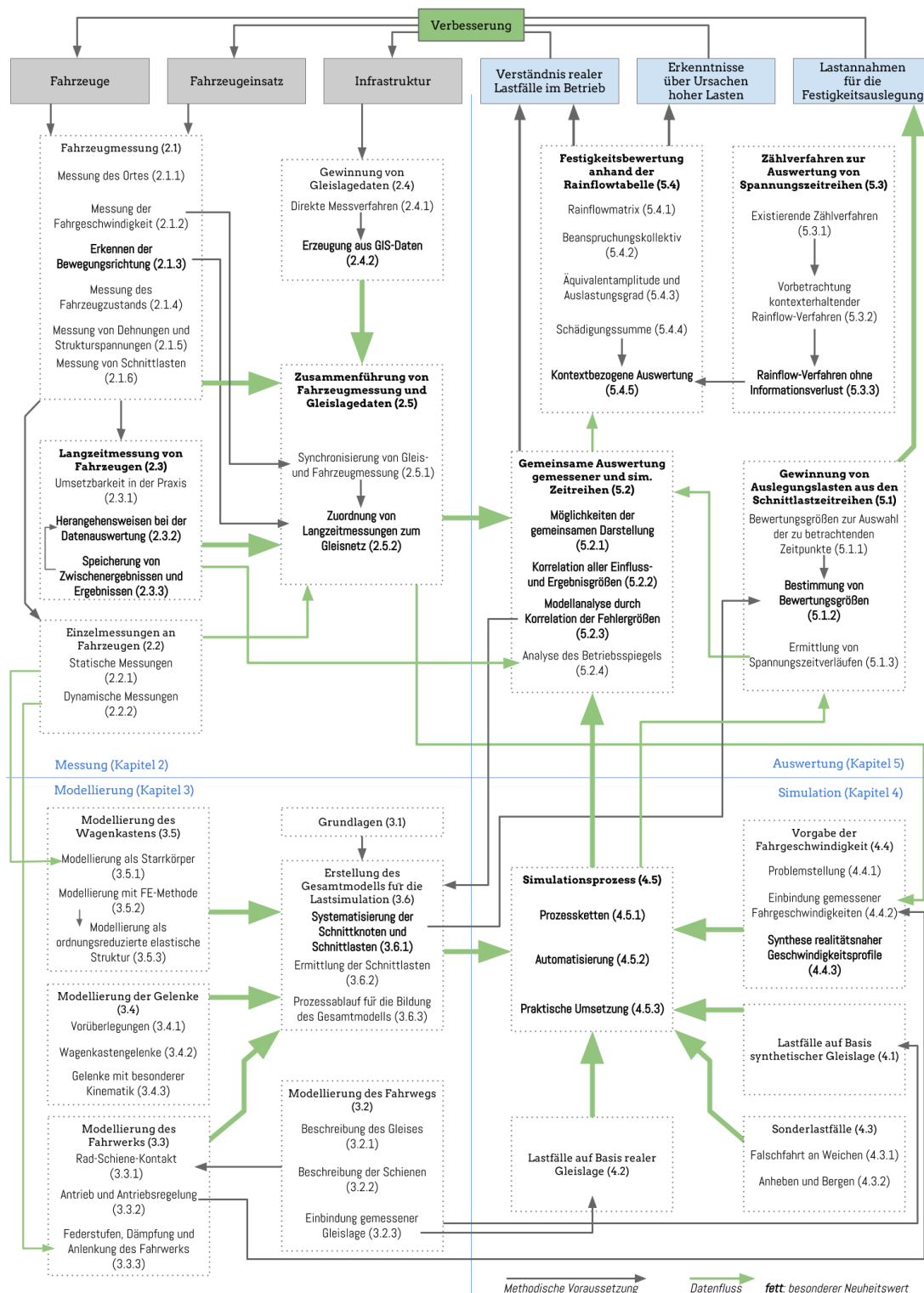


Bild 6.1: Struktur der Arbeit und Verknüpfung ihrer Inhalte

aller Gleisachsen an allen Weichen als vorteilhaft heraus, da dies die Verkettung der Gleissegmente in beliebige Gleisfolgen erleichtert.

Damit die zu Fahrzeug und Gleis erfassten Daten gemeinsam in der Simulation Einzug halten und in der Auswertung ganzheitlich betrachtet werden können, ist eine Zusammenführung der unterschiedlichen Messungen erforderlich. Hierfür wird ein Kreuzkorrelationsverfahren ausformuliert, um kurze Messabschnitte anhand von Gleiskrümmung und Fahrzeugdrehraten in Deckung zu bringen.

Für Langzeitmessungen wird ein neues, systemtheoretisches Modell des Gleisnetzes entworfen. In diesem erfolgt die Beschreibung des Gleisnetzes als endlicher Zustandsautomat, dessen Zustände über die Kombination von Gleissegmenten und Fahrtrichtungen gebildet werden und dessen Transitionen die Weichenverbindungen darstellen. Mit Hilfe eines ebenfalls neu vorgestellten globalen Optimierungsverfahrens kann eine Zuordnung von Langzeitmessungen zu diesem Gleismodell erreicht werden, wobei der Suchraum für die wahrscheinlichste Gleisfolge genau alle physikalisch möglichen Gleisfolgen umfasst. Durch einen weiteren, rekursiven Korrelationsalgorithmus wird die fahrzeugseitig gemessene Geschwindigkeit und der daraus berechnete Weg so entzerrt, dass auch über große Wegstrecken eine möglichst exakte Weg-Zeit-Zuordnung zwischen Fahrzeug und Gleis erreicht wird.

6.1.2 Modellbildung

Über die Qualität simulierter Lastannahmen wird ganz wesentlich bei der Modellierung entschieden, da die Ergebnisse der Simulation keine höhere Genauigkeit aufweisen können wie die zugrundeliegenden Eingangsdaten. Auch können nur jene der tatsächlichen Fahrzeugeigenschaften Einfluss auf die simulierten Lasten nehmen, die im Modell abgebildet sind – unabhängig davon, wie hoch ihr Einfluss in der Wirklichkeit ist.

In dieser Arbeit wird der gesamte Modellbaum im Hinblick auf die Lastsimulation betrachtet. Ausgehend vom Fahrweg werden der Rad-Schiene-Kontakt, das Fahrwerk, die Fahrwerksanbindung und die Wagenkastengelenke diskutiert und schließlich verschiedene Herangehensweisen für die Modellierung der Wagenkästen selbst aufgezeigt.

Um zu einer domänenübergreifenden Bestimmung und Beurteilung von Schnittlastzeitverläufen zu gelangen, wird eine möglichst allgemeingültige Systematisierung der Schnittknoten- und Schnittlastbeschreibung vorgenommen. Praktische Aspekte für den Aufbau von Fahrzeugmodellen mit ausschließlich elastischen Wagenkastenstrukturen werden diskutiert. Dabei wird gezeigt, dass sich der Modellierungsprozess nahtlos in die heutige Fahrzeugentwicklung einbinden lässt.

6.1.3 Simulation

Die Auswahl und die Gestaltung der Simulationsszenarien ist maßgeblich für die Höhe der simulierten Lasten. Werden Lastfälle dabei zu konservativ angesetzt, kann dies eine Überdimensionierung der Fahrzeuge zur Folge haben, werden lastkritische Lastfälle vernachlässigt, besteht die Gefahr der Unterdimensionierung.

Diese Arbeit behandelt daher zum einen das Aufstellen geeigneter Simulationsszenarien für die Abbildung bestehender und künftiger Trassierungen durch Kombination unterschiedlicher Gleislageparameter als synthetische Gleislage. Zum anderen stellt sie Methoden vor, um für bestehende Trassierungen mit Hilfe gemessener Gleislage oder Gleislageplänen realitätsnahe Lastfälle zu erstellen. Dabei wird die Bedeutung wirklichkeitsgetreuer Fahrgeschwindigkeiten hervorgehoben. Es wird gezeigt, dass die Geschwindigkeitsprofile individueller Trassierungen aus der Fahrzeugmessung gewonnen oder anhand der Gleis- und Fahrzeugparameter in idealisierter Form ermittelt werden können. Ergänzend wird die Simulierbarkeit ausgewählter Sonderlastfälle betrachtet.

Um den oft differierenden Anforderungen und Untersuchungszielen Rechnung tragen zu können, werden verschiedene Prozessketten für die Automatisierung des Simulationsablaufs vorgestellt. Indem fehlende Eingangsdaten bestmöglich ergänzt werden, können so Lastfälle auf Grundlage sehr unterschiedlicher Informationslage erstellt werden.

Damit die große Menge an Lastfälle Berücksichtigung finden kann, wird aufgezeigt, wie sich die unterschiedlichen Prozessketten in einem einheitlichen System vollständig automatisieren lassen. Durch eine zentrale Prozesssteuerung und Datenverwaltung bleiben die Daten aus Gleismessung, Fahrzeugmessung, Synthese und Simulation stets im gleichen Bezugssystem.

6.1.4 Auswertung

Die gemeinsame Auswertung der Daten aus Simulation und Messung schafft die Möglichkeit, Ursachen für hohe Lasten, die Lasten selbst und die resultierenden Beanspruchungen ganzheitlich betrachten zu können. Für die Gewinnung eines reduzierten Satzes an Auslegungslasten für die Festigkeitsauslegung in der Fahrzeugentwicklung wird ein Verfahren zur Identifizierung relevanter Lastzustände benötigt. Dafür werden Vorschläge aus der im Entwurf befindlichen Neufassung der VDV Richtlinie 152 aufgegriffen, systematisiert, erweitert und in einem Formelwerk niedergeschrieben. Für den Abgleich von Simulation und Messung wird beschrieben, wie sich aus simulierten oder gemessenen Lastzeitverläufen Beanspruchungszeitverläufe ermitteln lassen. Möglichkeiten zur gemeinsamen Darstellung dieser Größen mit allen vorliegenden Eingangs- und Ergebnisgrößen werden gezeigt. Das einheitliche Bezugssystem erlaubt weiter auch die Ermittlung von Korrelationskoeffizienten der Zeitverläufe, was erste Rückschlüsse auf

Zusammenhänge und Ursachen hoher Lasten und Beanspruchungen erlaubt. Statistische Verfahren zur Bestimmung des Betriebsspiegels unbegleiteter Fahrzeugmessungen werden aufgestellt.

Werden die Beanspruchungszeitverläufe einer Betriebsfestigkeitsbewertung unterzogen, vereitelt die hohe Datenkompression bestehender Verfahren zur Zählung von Schädigungsereignissen eine kontextabhängige Betrachtung. Dies stellt vor allem bei der Auswertung von Langzeitmessungen unter wechselnden Rahmenbedingungen ein Problem dar. Das als Stand der Technik geltende Rainflow-Zählverfahren wird daher von Grund auf so modifiziert und ergänzt, dass es ohne Informationsverlust, das heißt ohne Verlust des Zeitbezugs und ohne Genauigkeitsverlust durch Klassierung, anwendbar ist. Als Basis dient eine Rainflowtabelle, die in der Arbeit erstmals formuliert wird. Sie protokolliert alle Lastspiele einer Messstelle und damit jedes einzelne Schädigungsereignis. Bestehende Verfahren zur Gewinnung von Beanspruchungskollektiven, Äquivalentamplituden, Schädigungssummen und Auslastungsgraden werden auf diese Beschreibung angepasst. Die Rainflowtabelle kann ohne erneute Zählung durch Kontextdaten aus Gleismessung, Fahrzeugmessung und Simulation ergänzt und anhand dieser Daten in Teiltabellen zerlegt werden. Dies ermöglicht eine Auswertung der Wagenkastenbeanspruchung in Abhängigkeit beliebiger Einflussfaktoren.

6.2 Ausblick

Die Gewinnung von Lastannahmen ist eine datenintensive Herausforderung. Je mehr und je genauere Informationen über die Infrastruktur, das Fahrzeug und über den tatsächlichen Fahrzeugeinsatz vorliegen, desto vollständiger und verlässlicher sind die erreichbaren Ergebnisse. Dabei können diese Informationen von Projekt zu Projekt stark differieren. Eine zuverlässige, vollständige und wirtschaftliche Erfassung der Gleislage ganzer Inselnetze ist ein zentraler Baustein – zum jetzigen Zeitpunkt sind diese drei Anforderungen jedoch noch nicht gleichzeitig erfüllbar. Eine ebenso große messtechnische Entwicklungsaufgabe stellt die großflächige Erfassung von Fahrzeugdaten während des Betriebs dar. Sie erfordert die Anwendung platz- und kosteneffizienter Messtechnik. Ersteres ist nur durch digitale, kabellose Sensordatenübertragung oder starker Modularisierung möglich. Letzteres nur durch die Nutzung von Komponenten aus der Massenfertigung. Im Augenblick ist dies insbesondere für die Messung von Strukturspannungen noch ein Widerspruch. Zusätzliche Messkanäle würden auch die konsequente Erfassung des ebenen Dehnungszustands anstelle der einachsigen Dehnung ermöglichen und die Validierung der Berechnung vereinfachen.

Für die Abbildung des Systems Fahrzeug/Gleis in der Simulation ist die weitere Auseinandersetzung mit jenen Bauteilen erforderlich, die derzeit meist vereinfacht modelliert

werden. So wäre die Untersuchung des Einflusses kleiner Massen, zum Beispiel von oft masselos modellierten Feder- und Dämpferelementen, ein bedeutsamer Entwicklungsschritt. Die in der Arbeit verfolgte Herangehensweise, auf die kinematische Bindung an Gelenken zu verzichten, erlaubt beispielsweise auch eine detailliertere Berücksichtigung von Lagersteifigkeiten. Um dort den Einfluss von Bauteiltoleranzen, Temperaturschwankungen, Alterung und Verschleiß vollständig abbilden zu können, ist eine Variation von Modellparametern erforderlich. Betriebe man diese Variation konsequent, würde sich die Anzahl an Simulationsläufen um mehrere Größenordnungen erhöhen, was mit künftiger Rechentechnik jedoch kein Hindernis darstellen muss. Auch eine bessere Kenntnis der Schwerpunkthöhen und Trägheitstensoren der einzelnen Wagenteile würde die Ergebnisgüte wohl weiter verbessern. Beide Werte sind an vollständig ausgebauten, zusammengefügt Fahrzeugen messtechnisch jedoch nur schwer erfassbar. Eine praktische Weiterentwicklung von Methoden zur Verwiegung ist hier ebenso gefragt wie verbesserte Prozesse zur Ermittlung aus 3D-Konstruktionsdaten.

Der Prozess des Fahrzeugentwurfs, der Gewinnung von Lastannahmen und der Festigkeitsauslegung der Wagenkästen muss als iterativer Vorgang verstanden werden, dessen Ziel es sein muss, möglichst viele Iterationen in möglichst kurzer Zeit zu bewerkstelligen. In diesem Ablauf existieren neben informationstechnischen Hürden, wie der oft mangelnden Verknüpfung domänenspezifischer Werkzeuge für Konstruktion, Simulation und strukturdynamischer Berechnung, auch viele Fragestellungen, die Potenzial für eine wissenschaftliche Auseinandersetzung bieten. So fehlen beispielsweise zuverlässige Methoden zur automatischen Vernetzung der Wagenkastenstrukturen für die Finite-Elemente-Methode. Gelänge es, den Gesamtprozess durchgängiger zu gestalten und die Fahrzeugkonstruktion stärker zu parametrisieren, wäre die Entwicklung entsprechender Optimierungsalgorithmen für Fahrzeugparameter gefragt.

Die Kenntnis sicherer Lastannahmen bleibt ein Schlüsselaspekt bei der Fahrzeugentwicklung, denn nur auf ihrer Basis kann eine optimale Festigkeitsauslegung erfolgen. Deren Nutzen ist unbestreitbar: Robuste, langlebige Wagenkästen bilden zum einen den Grundstein für einen dauerhaft kostengünstigen und zuverlässigen Fahrzeugeinsatz. Zusätzlich kann es mit der weiteren Optimierung der Wagenkastenstruktur gelingen, leichtere, größere und noch effizientere Straßen- und Stadtbahnen zu bauen, die den Ansprüchen einer zunehmend urbanen und mobilen Gesellschaft auch in Zukunft gerecht werden.

Literaturverzeichnis

- [Astm85] American Society for Testing and Materials. *ASTM E1049 - 85 (Reapproved 2011), Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis*. 1985.
- [Astm13] American Society for Testing and Materials. *ASTM E837 - 13a, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. 2013.
- [Aub96] Matthew Aubury. „Binomial Filters“. In: *Journal of VLSI Signal Processing* 12 (1996), Seiten 35–50.
- [BC68] M. C. C. Bampton und R. R. Craig Jr. „Coupling of substructures for dynamic analyses.“ In: *AIAA Journal* 6.7 (1968), Seiten 1313–1319.
- [Bar95] Alan R. Barnett. *Closed-form Static Analysis with Inertia Relief and Displacement-dependent Loads Using a MSC/NASTRAN DMAP Alter*. NASA technical memorandum. National Aeronautics und Space Administration, 1995.
- [Bei12] Stefan Beisitzer. *Modellreduktion von FE-Modellen mit Balken- und Schalelementen am Beispiel eines elastischen Wagenkastens*. Großer Beleg. Technische Universität Dresden. 2012.
- [Bei06] Michael Beitelschmidt. *Gekoppelte Simulation und Echtzeitsimulation – Skript zur Vorlesung*. Juni 2006.
- [BHZD10] Michael Beitelschmidt, Matthias Harter, Gero Zechel und Gunther Dürrschmidt. „Die Dresdner Messstraßenbahn: Ein Erprobungsträger für Messtechnik, Langzeitbeobachtung und Ausbildung“. In: *ZEVRail Glasers Annalen* 143 (2010), Seiten 160–168.
- [Bel61] Richard E. Bellman. *Adaptive Control Processes: A Guided Tour*. Rand Corporation. Research studies. Princeton University Press, 1961.
- [Bob+08] Steffen Bobsien, Bernd Hänel, Lutz Uebel, Peter Scholz, Robert Mertens, Thomas Weise, Andreas Rittenschober und Friedrich Vemmer. *Moderne Festigkeitsauslegung von Niederflur-Straßenbahnen auf Basis der Combino-Erfahrungen*. Feb. 2008.

- [BSH11] Marcus von Borany, Alois Starlinger und Johann Habenbacher. „Klassifizierung der Einflussparameter auf die Betriebsfestigkeit von Straßenbahnen“. In: *11. Internationale Schienenfahrzeugtagung 23. - 25. Februar 2011*. Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, DVV Media Group/Eurailpress, 2011, Seiten 78–80.
- [Bos87] BMJV. *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BO-Strab)*. BEKA Verlag. Köln, Dez. 1987.
- [Bug+92] H. Bugarcic, L. Geers, E. Meyer-Plate und Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. Schienenfahrzeugausschuß. *Empfehlungen für die Festigkeitsauslegung von Personenzugfahrzeugen nach BOStrab*. Band 152. VDV-Schriften. VDV, 1992.
- [Bug+89] Helmut Bugarcic, Milan Breznovsky und Peter Kasten. *Experimentelle Erfassung der für die Festigkeitsauslegung von Stadtverkehr-Schienenfahrzeugen repräsentativen laufdynamischen Rechenparameter. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben des Bundesministers für Verkehr, Auftragsnummer 70211/87*. Technischer Bericht. Juli 1989.
- [Chr09] Christoph Weidemann. „Understanding Damping“. In: *SIMPACK News* 13.1 (Juni 2009). Herausgegeben von Intec GmbH, Seite 13.
- [Cla98] Tom Clark (clark@tomcat.gsfc.nasa.gov). *How a GPS Receiver Gets a Lock*. <http://gpsinformation.net/main/gpslock.htm>. Juli 1998.
- [CLRS09] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest und Clifford Stein. *Introduction to Algorithms, Third Edition*. 3rd. The MIT Press, 2009.
- [Dod08] Assistant Secretary of Defense for Command, Control, Communications, and Intelligence. *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*. 4. Auflage. United States of America. Department of Defense, 2008.
- [Dow71] N.E. Dowling. *Fatigue Failure Predictions for Complicated Stress-strain Histories*. T. & A.M. report. Department of Theoretical und Applied Mechanics, University of Illinois, 1971.
- [DS82] S.D. Downing und D.F. Socie. „Simple rainflow counting algorithms“. In: *International Journal of Fatigue* 4.1 (1982), Seiten 31 –40.
- [Dro04] S. Dronka. *Die Simulation gekoppelter Mehrkörper- und Hydraulik-Modelle mit Erweiterung für Echtzeitsimulation*. Berichte aus der Fahrzeugtechnik. Shaker, 2004.

- [Dvs07] Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. *Richtlinie DVS 1612 – Gestaltung und Dauerfestigkeitsbewertung von Schweißverbindungen an Stählen im Schienenfahrzeugbau*. 2007.
- [En10] Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF) im DIN. *Bahnanwendungen – Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen – Teil 2: Güterwagen; Deutsche Fassung EN 12663-2:2010*. Norm. 2010.
- [En13] Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF) im DIN und Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS) im DIN. *DIN EN 15085 - Bahnanwendungen - Schweißen von Schienenfahrzeugen und Schienenfahrzeugteilen*. Norm. 2008-2013.
- [End92] Tatsuo Endo. „Prof. Tatsuo Endo’s original papers presented at JSME meeting during 1967–1968“. In: *The Rainflow Method in Fatigue. The Tatsuo Endo memorial volume: Papers presented at the International Symposium on Fatigue Damage Measurement and Evaluation Under Complex Loadings*. Herausgegeben von Y. Murakami. Butterworth-Heinemann, 1992, Seiten xii –xxiv. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750605045500060>.
- [EMMKT74] Tatsuo Endo, Masanori Matsuishi, Koichi Mitsunaga, Kakuichi Kobayashi und Kiyohumi Takahashi. *Rain Flow Method, the proposal and the applications*. 1974. URL: <http://hdl.handle.net/10228/3927>.
- [EMN67] Tatsuo Endo, Koichi Mitsunaga und H. Nakagawa. „Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress – Prediction of Fatigue Lives“. In: *Preliminary Proceedings of The Chugoku-Shikoku District Meeting*. The Japan Society of Mechanical Engineers, Nov. 1967, Seiten 41–44.
- [EMNI67] Tatsuo Endo, Koichi Mitsunaga, H. Nakagawa und K. Ikeda. „Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress — Low Cycle, Middle Cycle Fatigue“. In: *Preliminary Proceedings of The Chugoku-Shikoku District Meeting*. The Japan Society of Mechanical Engineers, Nov. 1967, Seiten 45–48.
- [FKPT10] Ludwig Fahrmeir, Rita Künstler, Iris Pigeot und Gerhard Tutz. *Statistik – Der Weg zur Datenanalyse*. 7. Auflage. Springer, Berlin, 2010.
- [Fkm12] Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM). *FKM-Richtlinie. Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen*. 6. Auflage. VDMA-Verlag, 2012.

- [Ger13] Ulf Gerber. „Auslegung des Eisenbahnoberbaus“. In: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Herausgegeben von Lothar Fendrich und Wolfgang Fengler. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, Seiten 39–64.
- [GK87] G. Glinka und J.C.P. Kam. „Rainflow counting algorithm for very long stress histories“. In: *International Journal of Fatigue* 9.4 (1987), Seiten 223–228.
- [Goo14] Google Inc. *The Google Elevation API*. <https://developers.google.com/maps/documentation/elevation/>. 2014.
- [Hai06] Erwin Haibach. *Betriebsfestigkeit*. 3. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [Har12] Matthias Harter. *Durchgängige Simulation von Strukturspannungen in Straßenbahnen unter Berücksichtigung gemessener Gleislage*. Sierke Verlag, 2012.
- [HBSS09] Matthias Harter, Michael Beitelschmidt, Gerd Striegler und Ingolf Sauer mann. „Die Dresdner Messstraßenbahn: Konzept, Architektur, Komponenten“. In: *ETR. Eisenbahntechnische Rundschau* 12 (2009), Seiten 716–721.
- [Her82] Heinrich Hertz. „Ueber die Berührung fester elastischer Körper.“ ger. In: *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 92 (1882), Seiten 156–171. URL: <http://eudml.org/doc/148490>.
- [Hob96] A. Hobbacher. *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. International Institute of Welding (IIW), doc. XIII-1539-96/XV-845-96. Abington, 1996.
- [Hof87] K. Hoffmann. *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1987.
- [HWLW07] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger und E. Wasle. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer, 2007.
- [Hon07] Harry Hondius. „Der Stand der Combino-Sanierung im Frühjahr 2007“. In: *Stadtverkehr* 3 (2007), Seiten 26–28.
- [Hoo78] Robert Hooke. *Lectures de Potentia Restitutiva, Or of Spring Explaining the Power of Springing Bodies*. John Martyn, 1678. URL: <http://books.google.de/books?id=LAtpAAAAcAAJ>.

- [Imm14] Florian Immel. *Model Updating eines Wagenkastens unter Berücksichtigung von Einbauten und Untersuchung der Auswirkung auf die Gelenkschnittlasten*. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. 2014.
- [Sim08] Simpack AG. *SIMDOC – Track Module, TRACK:1 Definition of Track*. 8.901. Okt. 2008.
- [Kal67] J.J. Kalker. „On the Rolling Contact of Two Elastic Bodies in the Presence of Dry Friction“. Dissertation. Delft University of Technology, Department of Mechanical Engineering, 1967. URL: <http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:aa44829b-c75c-4abd-9a03-fec17e121132/P1219-6253.pdf>.
- [Kal90] J.J. Kalker. *Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact*. Solid Mechanics and Its Applications. Springer, 1990.
- [KVC12] Georges Kouroussis, Olivier Verlinden und Calogero Conti. „Efficiency of resilient wheels on the alleviation of railway ground vibrations“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 226.4 (2012), Seiten 381–396.
- [Kou09] Panagiotis Koutsovasilis. „Model order reduction in structural mechanics: Coupling the rigid and elastic multi body dynamics“. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2009.
- [Kra12] Philipp Krause. *Entwicklung eines parametrierbaren Luftfedermodells in MATLAB/Simulink zur Simulation von Straßen- und Stadtbahnen in SIMPACK*. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. 2012.
- [Kzv10] Komerčni Železnični Vyzkum (KZV). *KRAB Railway geometry measuring system, User Manual*. Juli 2010.
- [Lan37] B. F. Langer. „Fatigue failure from stress cycles of varying amplitude“. In: *Journal of Applied Mechanics* (1937), A160–A162.
- [LB12a] Claudius Lein und Michael Beitelschmidt. „MORPACK-Schnittstelle zum Import von FE-Strukturen nach SIMPACK.“ In: *Automatisierungstechnik* 60.9 (2012), Seiten 547–560.
- [LB12b] Claudius Lein und Michael Beitelschmidt. „MORPACK-Schnittstelle zum Import von FE-Strukturen nach SIMPACK.“ In: *Automatisierungstechnik* 60.9 (2012), Seiten 547–560.
- [Len14] Michael Lenz. *Error-controlled Model Reduction in Structural Mechanics based on Balanced Truncation*. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. Aug. 2014.

- [Len12] Michael Lenz. *Import von Streckenplänen für die Mehrkörpersimulation von Schienenfahrzeugen, Erstellung einer Anwendersoftware*. Interdisziplinäre Projektarbeit. Technische Universität Dresden. 2012.
- [ME68] Masanori Matsuishi und Tatsuo Endo. „Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress — Fatigue Lives under Random Loading“. In: *Preliminary Proceedings of The Kyushu District Meeting*. The Japan Society of Mechanical Engineers, März 1968, Seiten 37–40.
- [Min45] Milton A. Miner. „Cumulative damage in fatigue“. In: *Journal of applied mechanics* 3 (1945), Seiten 159–164.
- [Mül14] Andre Müller. *Modellierung und Reduktion dünnwandiger Strukturen zur Verwendung in elastischen Mehrkörpersystemen am Beispiel eines Wagenkastens*. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. 2014.
- [Mun13] Randall Munroe. *Is It Worth the Time?* Apr. 2013. URL: <http://xkcd.com/1205/>.
- [Net98] Helmut Netter. *Rad-Schiene-Systeme in differential-algebraischer Darstellung*. Fortschrittsberichte VDI. VDI-Verlag, 1998.
- [Nor12] Edwin F. Northrup. *Methods of Measuring Electrical Resistance*. McGraw-Hill Book Company, 1912, Seiten 51–54.
- [Ore77] ORE. *C 116/RP 8/D, Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Gleis, Verfahren zur Beurteilung des Komforts eines Schienenfahrzeuges*. Apr. 1977.
- [OW02] T. Ottmann und P. Widmayer. *Algorithmen und Datenstrukturen*. Spektrum Akademischer Verlag, 2002.
- [Pal24] Arvid Palmgren. „Die Lebensdauer von Kugellagern“. In: *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure* 14 (1924), Seiten 339–341.
- [Pan10] Felix Panitz. *Eckkraftverwiegung von Multigelenkfahrzeugen*. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. 2010.
- [Pet10] M.D. Petz. *Fahrzeug mit mehreren gelenkig verbundenen Wagenkästen*. DE Patent App. DE200,810,063,260. Sep. 2010.
- [Pol10] Oldrich Polach. „Characteristic parameters of nonlinear wheel/rail contact geometry“. In: *Vehicle System Dynamics* 48.sup1 (2010), Seiten 19–36.
- [Pol11] Oldrich Polach. *Kontakt Rad-Schiene: Ein kleines Detail mit grossen Auswirkungen*. Antrittsvorlesung, ETH Zürich. Nov. 2011.

- [Qua04] Volker Quarz. „Die Generierung von Fahrwegstörungen für vorgegebene Spektraldichten mit Hilfe orthogonaler Funktionen“. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2004.
- [RMDH12] Roland Rennert, Uwe Möser-Drechsler und Harald Hentschel. „Zur Bewertung gemessener Betriebsbeanspruchungen“. In: *12. Internationale Schienenfahrzeugtagung 12. - 14. September 2012*. Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, DVV Media Group/Eurailpress, Sep. 2012, Seiten 98–100.
- [RK76] F. Reuleaux und A.B.W. Kennedy. *The Kinematics of Machinery: Outlines of a Theory of Machines*. Macmillan und Company, 1876.
- [Riv92] R. Rivest. *The MD5 Message-Digest Algorithm*. RFC 1321. Updated by RFC 6151. MIT Laboratory for Computer Science und RSA Data Security, Inc., Apr. 1992. URL: <http://www.ietf.org/rfc/rfc1321.txt>.
- [Ryc87] I. Rychlik. „A new definition of the rainflow cycle counting method“. In: *International Journal of Fatigue* 9.2 (1987), Seiten 119–121.
- [SRV08] W.H.A. Schilders, J. Rommes und H.A. van der Vorst. *Model Order Reduction: Theory, Research Aspects and Applications: Theory, Research Aspects and Applications*. European Consortium for Mathematics in Industry. Springer, 2008.
- [SSS10] Christan Schindler, Martin Schwickert und Andreas Simonis. „Structural safety of trams in case of misguidance in a switch“. In: *Vehicle System Dynamics* 48.8 (Aug. 2010), Seiten 967–981.
- [SKK07] A.L. Schwab und C.M. Kalker-Kalkman. „Joost J. Kalker (1933-2006): A Life in Rolling Contact“. In: *Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Las Vegas, NV, USA, 2007. URL: <http://bicycle.tudelft.nl/schwab/Publications/SchwabKalker-Kalkman2007.pdf>.
- [SK11] H.R. Schwarz und N. Köckler. *Numerische Mathematik*. 8. Auflage. Teubner, 2011.
- [SSB79] D. Socie, G. Shifflet und H. Burns. „A field recording system with applications to fatigue analysis“. In: *International Journal of Fatigue* 1.2 (1979), Seiten 103–111.

- [TB15] Christian Telke und Michael Beitelschmidt. *A Novel modular measurement system for the development of light rail vehicles*. IAVSD - 24th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Graz. 2015.
- [Tou95] J. Touch. *Report on MD5 Performance*. RFC 1810. Internet Engineering Task Force, Juni 1995. URL: <http://www.ietf.org/rfc/rfc1810.txt>.
- [Vdi93] VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik. *VDI 3633 Blatt 1, Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen; Grundlagen*. Dez. 1993.
- [Vdv16] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV). Schienenfahrzeugausschuss. *Empfehlungen für die Festigkeitsauslegung von Personenzugfahrzeugen nach BOStrab*. Band 152. VDV-Schriften. VDV, vsl. 2016.
- [Voc10] Stefan Vockrodt. „Viele Gelenke, viele Probleme. Variobahn und Combino - Entwicklung, Technik und Probleme der Multigelenker“. In: *Straßenbahn Magazin* 5 (2010), Seiten 12–23.
- [Wol14] WolframAlpha. *Dresden Germany Temperature between Nov 25 2010 and Dec 2 2010*. <https://www.wolframalpha.com/input/?i=Dresden+Germany+Temperature+between+Nov+25+2010+and+Dec+2+2010>. Jan. 2014.
- [ZS09] Khaled E. Zaazaa und A.L. Schwab. „Review of Joost Kalker’s Wheel-Rail Contact Theories and Their Implementation in Multibody Codes“. In: *Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. San Diego, CA, USA, 2009, Seiten 1889–1900. URL: <http://bicycle.tudelft.nl/schwab/Publications/ZaazaaSchwab2009.pdf>.
- [Zec09] Gero Zechel. *Konzeption und Implementierung eines Rechenmoduls für das MKS-Programm SIMPACK zur dynamischen Lichtraumausslegung von Nahverkehrsfahrzeugen*. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. 2009.
- [Zec08] Gero Zechel. *Ortung von Schallquellen an bewegten Fahrzeugen durch Beamforming im Zeitbereich*. Studienarbeit. Technische Universität Dresden. 2008.
- [ZTZ05] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor und J.Z. Zhu. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Elsevier Science, 2005.

Tabellenverzeichnis

2.1	Messstraßenbahn Dresden – Sensorsignale für Drehgestell, Kopfwagen, Mittelwagen (Sänfte) und Endwagen, sowie Signale des Fahrzeugbus . . .	24
3.1	Fahrwerksabstand entlang der Gleismittenachse auf der Geraden/im 16m-Bogen, am Beispiel einer siebenteiligen Multigelenkstraßenbahn	59
3.2	Beispiel für eine systematische Nummerierung der Schnittknoten und Schnittlasten der Wagenkästen	73
5.1	Rainflow-Verfahren ohne Informationsverlust, Zwischentabellen für die Erfassung halber Hystereseschleifen in Zugrichtung und Druckrichtung .	124
5.2	Rainflow-Verfahren ohne Informationsverlust, Rainflowtabelle für die Erfassung aller geschlossenen Hystereseschleifen eines Signals	127
5.3	Rainflow-Verfahren ohne Informationsverlust, Ergänzung der Rainflow-tabelle um Auswertungsspalten	130
5.4	Rainflow-Verfahren ohne Informationsverlust, Ergänzung der Rainflow-tabelle um Auswertungsspalten	136
5.5	Rainflow-Verfahren ohne Informationsverlust, Ergänzung der Rainflow-tabelle um Zusatzdaten für die spätere Aufteilung	136

Abbildungsverzeichnis

1.1	Beispiel einer Lastbeschreibung nach der VDV-Richtlinie 152	2
1.2	FAT-Klassen nach IIW-Empfehlungen	4
2.1	Typisches GPS-Positionssignal	9
2.2	Vergleich unterschiedlicher Geschwindigkeitszeitsignale	13
2.3	Erkannte Fahrtrichtungswechsel bei einer Langzeitmessung eines Einrich- tungsfahrzeugs	15
2.4	Einsatz von Weggebern auf Basis induktiver Feldmessung	16
2.5	Dehnungsmessstreifen zur Messung der Normalspannung senkrecht einer Schweißnaht	17
2.6	Statische Fahrzeugmessung	21
2.7	Die Messstraßenbahn Dresden	23
2.8	Verarbeitungskonzept für Langzeitmessungen	29
2.9	Aus einem Gleisnetzplan ermittelte horizontale Gleiskrümmungen für das Netz Dresden	31
2.10	Systematisierung einer Gleisnetzzeichnung und Ableitung einer Weichen- und Gleisdatenbank	33
2.11	Beispiel der Zuordnung dreier Messläufe unterschiedlicher Fahrgeschwin- digkeit zur Gleiskilometrierung	38
2.12	Einfaches Gleisnetz, bestehend aus 8 Gleissegmenten und 5 Weichen, dargestellt als endlicher Automat	39
2.13	Erweiterung des endlichen Automaten auf zwei Fahrtrichtungen je Gleis- segment	41
2.14	Matrix der Strafwerte eines Beispiellortszeitverlaufs	44
2.15	Robuste Gleiszuweisung einer kurzen Fahrt trotz schlechter Anfangs- und Endwerte des GPS-Signals	45
2.16	Robuste, gleisselektive Gleiszuweisung trotz irreführenden Drifts des GPS- Signals	46
2.17	Verschiebungsverlauf zur Wegkorrektur über eine Strecke von 350 km . .	48
2.18	Vollständig entzerrte und in Deckung gebrachte fahrzeugseitig und gleis- seitig ermittelte Gleiskrümmungsverläufe	49

3.1	Beispiele gängiger Fahrzeugkonzepte für Straßen- und Stadtbahnen . . .	55
3.2	Mehrkörpermodell eines Fahrwerks einer Niederflurstraßenbahn	56
3.3	Veränderung der Berührgeometrie im Rad-Schiene-Kontakt in Abhängig- keit der Radsatzquerauslenkung	57
3.4	Nickaustgleich zwischen zwei Gelenken durch eine Dach-Lemniskate . . .	62
3.5	Gelenkkraft im oberen Gelenk einer Multigelenkstraßenbahn, Parameter- variation der Gelenklenkerlänge	63
3.6	Modell eines Wagenkastens nach der Finite-Elemente-Methode	68
3.7	Mehrkörpersystemmodell einer Multigelenkstraßenbahn mit Starrkörper- Wagenkästen, Einbindung der Wagenkästen als elastische Struktur . . .	70
3.8	Abstrahierte Darstellung aller Schnittknoten des Kopfwagens einer Stra- ßenbahn	74
3.9	Prozessablauf für die Fahrzeugmodellierung als elastisches Mehrkörper- system	75
3.10	Mehrkörpersystemmodell einer Straßenbahn mit Einbindung der Wagen- kästen als elastische Struktur	76
4.1	Einordnung der Begriffe Lastfälle und Lastannahmen in dieser Arbeit . .	77
4.2	Beispiel eines synthetischen Lastfalls für Gleisverwindung durch Überla- gerung von engem Bogen und starkem Gefälle	79
4.3	Beispiel eines Lastfalls auf Basis gemessener Gleislage	80
4.4	Falschfahrt an einer Weiche	81
4.5	Simulationsmodell Werkstattanheben an Absetzstellen unter Berücksich- tigung eines Ungleichlaufs der Hubanlage	82
4.6	Grafikausgabe des Programms zur Synthese eines Geschwindigkeitsprofils für vorgegebene Gleiskrümmungs- und Überhöhungsverläufe	86
4.7	Generiertes Geschwindigkeitsprofil im Vergleich mit der tatsächlich ge- fahrenen Geschwindigkeit	87
4.8	Vereinfachte Prozesskette zur Gewinnung der Schnittlastzeitverläufe un- ter Nutzung von Gleis- und Fahrzeugmessung	88
4.9	Alternative Prozessketten	89
4.10	Darstellung des vollständig automatisierten Gesamtprozesses	95
4.11	Entscheidungsbaum für die Stapelverarbeitung der Simulationsläufe in Simpack	96
5.1	In der Neuausgabe der VDV-Richtlinie 152 vorgeschlagenes Schnittebe- nenverfahren	98

5.2	Abstrahierte Darstellung der Schnittebenen und Auflistung der 24 möglichen Bewertungsgrößen für die Bestimmung der Auswertungszeitpunkte	101
5.3	Programmausgabe der ermittelten Extrema eines Bewertungslastfalls . .	103
5.4	Programmausgabe zum Vergleich gemessener und simulierter Strukturspannungen	104
5.5	Programmausgabe von Strukturspannungen, Fahrzeugzustandsgrößen und der Gleislage, synchronisiert in einem gemeinsamen System	106
5.6	Beispiel für eine Matrix der Korrelationskoeffizienten	107
5.7	Korrelation eines gemessenen Dehnungszeitsignals mit anderen Größen aus Fahrzeugmessung, Gleismessung und Simulation	108
5.8	Korrelation der Differenz des gemessenen und simulierten Dehnungszeitsignals mit allen anderen vorliegenden Größen	109
5.9	Heatmap der Messstraßenbahn Dresden, Anzahl Fahrten je Gleissegment über 163 000 km Fahrtstrecke	110
5.10	Histogramm der Fahrgeschwindigkeiten größer Null	111
5.11	Histogramm der Längsbeschleunigungen bei Fahrgeschwindigkeiten größer Null	112
5.12	Einsatz der Magnetschienenbremse	113
5.13	Beispiel eines Lastverlaufs nach der Betrachtungsweise der ASTM E1049	115
5.14	Originaldarstellungen der Rainflow-Methode nach ENDO et al.	118
5.15	Kontextabhängige Beanspruchungsermittlung	121
5.16	Konzept für ein erweitertes Rainflow-Verfahren	122
5.17	Rainflowmatrix, abgeleitet aus einer Rainflowtabelle mit $5 \cdot 10^8$ Hystereseschleifen	128
5.18	Darstellungsformen von Beanspruchungskollektiven in Abhängigkeit von Klassen- und Summenbildung	129
5.19	Nichtklassierte Beanspruchungskollektive an einer Dehnungsmessstelle am Wagenkasten, Entwicklung mit steigender Fahrtstrecke	131
5.20	Auswertungsrichtung bei Nutzung der Äquivalentamplitude	132
5.21	Auswertungsrichtung bei Nutzung der Schädigungssumme	135
5.22	Geschwindigkeitsbezogene Auswertung der Schädigungssumme	138
5.23	Schädigungssumme aufgeteilt nach Flächen zu je 10 m x 10 m	139
5.24	Farbcodierte Schädigungssumme aufgeteilt nach Gleisabschnitten der Länge 0,25 m	140
6.1	Struktur der Arbeit und Verknüpfung ihrer Inhalte	142